

Université de Montréal

Les effets d'un effort cognitif prolongé chez des athlètes ayant subi une commotion cérébrale

**Par
Gabriel Caron**

Département de Psychologie, Faculté des Arts et des Sciences

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade Maîtrise ès sciences en psychologie, option
recherche**

Mai 2020

©Gabriel Caron, 2020

Ce mémoire intitulé

Les effets d'un effort cognitif prolongé chez des athlètes ayant subi une commotion cérébrale

Présenté par
Gabriel Caron

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Élaine De Guise
Président-rapporteur

Dave Ellemberg
Directeur de recherche

Jérôme Gauvin-Lepage
Membre du jury

Résumé

La fatigue est l'un des symptômes les plus fréquents et persistants chez les victimes de commotion cérébrale. Au cours des dernières années, des signes d'altérations cognitives post-commotionnelles à la suite d'un effort aérobique, soit une forme de fatigue dont la cause est physique plus que cognitive, ont été trouvés à court et à long terme chez des athlètes étudiants. Or, puisque ces athlètes évoluent dans un contexte où ils doivent non seulement performer dans leur discipline sportive, mais aussi à l'école ou au travail, il convient de se demander si un effort mental soutenu n'aurait pas le même effet chez cette population.

L'objectif de cette étude était donc de déterminer si des athlètes étudiants ayant subi une commotion cérébrale (groupe HC) se sentent plus fatigués ou ont davantage tendance à se fatiguer mentalement que ceux n'ayant jamais subi de commotion cérébrale (groupe ST). Les sujets devaient répondre à une série de questionnaires auto-rapportés. Ils devaient aussi compléter une tâche informatisée recrutant les fonctions exécutives avant et après avoir répondu à une épreuve de raisonnement, d'une durée d'une heure, visant à simuler un examen scolaire. Leur réaction physiologique à la tâche était mesurée via un appareil d'électroencéphalographie et un cardiofréquencemètre.

Si dans l'ensemble les résultats n'appuient pas l'hypothèse initiale, les deux groupes ont montré des différences notables dans leur façon de répondre à la tâche. Nous avons notamment constaté l'absence d'un effet de pratique à la condition la plus facile ainsi qu'une variabilité de la performance généralement plus élevée chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale. De plus, contrairement au groupe témoin, ceux qui rapportaient des symptômes plus importants de fatigue cognitive quotidienne, de somnolence et de dépression montraient également une moins bonne précision à la tâche après un effort cognitif soutenu. Ces résultats suggèrent que les commotions cérébrales pourraient avoir pour effet d'accroître la sensibilité de certains individus à l'effort cognitif. De futures études devraient se pencher sur cette relation afin de la confirmer et d'en comprendre les causes.

Mots-clés : Commotion cérébrale, fatigue cognitive, EEG, variabilité de la fréquence cardiaque, *task-switching*, pilote

Abstract

Fatigue is one of the most common and persistent symptoms in concussion victims. In recent years, signs of post-concussive cognitive impairment following aerobic exertion, a form of fatigue whose cause is more physical than cognitive, have been found in both short- and long-term in student athletes. However, since these athletes evolve in a context where they must not only perform in their sport, but also at school or at work, it is worth asking whether sustained mental effort would have the same effect in this population.

The objective of this study was therefore to determine whether student athletes who have suffered a concussion (HC group) feel more tired or are more likely to become mentally fatigued than those who have never suffered a concussion (ST group). Subjects were asked to complete a series of self-report questionnaires. They were also required to complete a computerized task recruiting executive functions before and after completing a one-hour reasoning test meant to simulate a school examination. Their physiological response to the task was measured using electroencephalography and a heart rate monitor.

While the results do not support the original hypothesis, the groups showed significant differences in the way they responded to the task. Particularly, we found the absence of a practice effect at the easiest condition as well as a generally higher performance variability in subjects with a history of concussion. In addition, unlike the control group, those who reported greater symptoms of daily cognitive fatigue, drowsiness and depression also showed poorer task accuracy after sustained cognitive effort. These results suggest that concussions may have the effect of increasing the sensitivity of some individuals to cognitive effort. Future studies should investigate this relationship in order to confirm it and understand its causes.

Key Words: Concussion, cognitive fatigue, EEG, heart rate variability, task-switching, pilot

Table des matières

Liste des tableaux	8
Liste des figures	9
Abréviations	10
Remerciements	12
Introduction	13
Une définition de la fatigue	14
La fatigabilité de performance	14
L'origine multifactorielle de la fatigue	16
Fatigue subjective et performance générale	17
L'imagerie cérébrale et l'étude des TCC légers	17
L'électroencéphalographie en tant qu'outil de mesure de la fatigue cognitive	18
L'activité EEG et la charge de travail	18
La signature EEG de la fatigue cognitive	27
Les conséquences des commotions cérébrales sur la fatigabilité cognitive	31
Données comportementales et auto-rapportées	31
Comment se manifestent les différences au niveau des fonctions exécutives et du <i>task-switching</i> sur le plan physiologique ?	32
Liens entre commotions cérébrales, fonctions exécutives et fatigabilité cognitive	34
La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) en tant qu'indicateur du fonctionnement du cortex préfrontal	35
Objectifs	37
Hypothèses	38
Méthode	40
Participants	40
Procédure	41
Outils de mesure	42
Traitement des données	49
Données comportementales	49
Données EEG	50
Données d'électrocardiographie (ECG)	51

Exclusion des données.....	51
Analyses	53
Données démographiques.....	53
Données relatives aux questionnaires.....	53
Données comportementales.....	54
Analyse des données EEG.....	55
Analyse de la VFC	56
Résultats	58
Données démographiques.....	58
Données relatives aux questionnaires.....	60
Performance à l'épreuve de raisonnement.....	68
Performance à la tâche Switch	68
Résultats EEG.....	80
Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC).....	81
Discussion	81
L'épreuve de raisonnement, l'effort cognitif et la fatigue subjective situationnelle.....	82
La fatigue quotidienne subjective	83
Une relation différente entre la fatigue quotidienne et la performance	84
Un effet différentiel de la tâche sur la performance des groupes	85
La performance à la condition homogène	85
Une réaction différente à l'augmentation de la charge cognitive	86
Différences au niveau de l'activité physiologique	89
EEG	89
La variabilité de la fréquence cardiaque.....	91
L'hétérogénéité de la population avec un historique de commotion cérébrale.....	92
L'effet potentiel des commotions cérébrales sur la sensibilité à l'effort cognitif	94
Analyses exploratoires.....	96
Raisonnement et méthode.....	96
Résultats	98
Un profil de sous-groupe	102
Limites et faisabilité	105
Conclusion	104
Références	106

Annexe A - Formulaire d'information et de consentement	117
Annexe B – Questionnaire d'informations générales	124
Annexe C - Zephyr (BioHarness 3.0, Zephyr technology, Annapolis, USA).....	131
Annexe D - Filet d'électroencéphalographie, Geodesic Sensor Net™ (GSN, Electrical Geodesic System Inc., Eugene, USA	132
Annexe E - Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh	133
Annexe F – Index de Sévérité de l'Insomnie	137
Annexe G – Échelle de somnolence d'Epworth	138
Annexe H – Inventaire de dépression de Beck.....	139
Annexe I – Inventaire d'anxiété de Beck.....	141
Annexe J - CAARS	142
Annexe K – Inventaire de la douleur de McGill (version courte)	144
Annexe L – Échelle de gravité de la fatigue	146
Annexe M – Inventaire multidimensionnel de la fatigue	147
Annexe N – Échelles de Likert	148
Annexe O – Épreuve de raisonnement	149
Annexe P – Tâche Switch.....	165
Annexe Q – Annonce générale de l'étude.....	168
Annexe R – Certificat d'éthique.....	170

Liste des tableaux

Tableau 1	59
Tableau 2	61
Tableau 3	63
Tableau 4	99
Tableau 5	100
Tableau 6	100
Tableau 7	101
Tableau 8	101

Liste des figures

Figure 1.....	65
Figure 2.....	66
Figure 3.....	67
Figure 4.....	69
Figure 5.....	70
Figure 6.....	71
Figure 7.....	73
Figure 8.....	74
Figure 9.....	75
Figure 10.....	77
Figure 11.....	79
Figure 12.....	79
Figure 13.....	81
Figure 14.....	83
Figure 15.....	84

Abréviations

%HF:	Puissance spectrale relative des hautes fréquences de la VFC
ATP:	Adénosine triphosphate
BA:	<i>Brodman Area</i> (aire de Brodmann)
BAI:	<i>Beck Anxiety Inventory</i>
BDI-II:	<i>Beck Depression Inventory-II</i>
CAARS:	<i>Conners' Adult ADHD Rating Scale</i>
DSM:	<i>Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders</i>
ECG:	Électrocardiographie
EEG:	Électroencéphalographie
ESS:	<i>Epworth Sleepiness Scale</i>
FSS:	<i>Fatigue Severity Scale</i> (échelle de gravité de la fatigue)
HC:	Groupe avec un historique de commotion cérébrale
IMF-20 :	Inventaire multidimensionnel de la fatigue
IRMf:	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
ISI:	<i>Insomnia Severity Index</i>
LF/HF :	Ratio de la puissance spectrale des basses fréquences et des hautes fréquences de la VFC
LSAT:	<i>Law School Admission Test</i>
MCPQ:	<i>McGill Pain Questionnaire</i>
MEG:	Magnétoencéphalographie
PASAT:	<i>Paced Auditory Serial Addition Test</i>

PSQI:	<i>Pittsburgh Sleep Quality Inventory</i>
RMSSD:	<i>Root mean square of successive deviations</i> (mesure de la VFC)
SD1:	Mesure non-linéaire de la VFC à court terme
SD2:	Mesure non-linéaire de la VFC à long terme
SNC:	Système nerveux central
ST :	Groupe témoin
TCC:	Traumatisme craniocérébral
TDAH :	Trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité
VFC:	Variabilité de la fréquence cardiaque
WCST:	<i>Wisconsin Card Sorting Task</i>

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mes collègues pour l'aide apportée, mais également pour tous ces bons moments passés en-dehors du laboratoire. Un merci particulier à Veronik et Jean-Christophe. J'aimerais également remercier mon directeur, Dave Ellemberg, pour ses conseils et les corrections plus que nécessaires.

La réalisation de ce projet n'aurait jamais été possible sans l'aide de mes stagiaires dévoués. Un gros merci à Alexandra Lacasse-Courchesne et à Antoine Deslauriers pour leur proactivité et leur entrain, sans oublier Alejandra Martinez qui m'a supporté durant tout un été et qui a été une grande source de motivation. J'aimerais également exprimer ma gratitude à tous ces volontaires curieux qui ont accepté de donner de leur temps pour participer à ce projet.

Enfin, j'aimerais remercier ma mère, mon père et ma sœur pour leur appui inconditionnel dans tout ce que j'entreprends. Vous avez toujours cru en moi et rien ne me rend plus heureux que de vous avoir dans ma vie.

Introduction

La fatigue est l'un des symptômes les plus souvent rapportés chez les personnes ayant subi un traumatisme craniocérébral (TCC) (Cantor, Gordon et Gumber, 2013). Dans le cas des commotions cérébrales (entendus ici comme des TCC légers dont l'origine de la blessure est sportive) ou TCC légers, on estime que la fatigue serait présente chez environ 47% des individus 2 jours après le trauma, puis diminuerait de façon graduelle (Mollayeva et al., 2014). Sur les données obtenues auprès de 1438 athlètes âgés de 13 à 24 ans, Kontos et al. (2012) ont effectué une analyse factorielle exploratoire des symptômes post-commotionnels dans la phase aigüe (1 à 7 jours) et trouvé qu'avec les symptômes cognitifs et les migraines, la fatigue était l'un des symptômes les plus fréquents. Bien que la très grande majorité des athlètes soit considérée rétablie à l'intérieur des 2 premières semaines suivant une commotion cérébrale d'origine sportive, un constat récurrent est que certains individus vont souffrir de symptômes persistants, dans certains cas jusqu'à plusieurs mois après l'incident (McCrory et al., 2017). La fatigue fait partie des symptômes les plus fréquents lors de la phase aigüe du trauma et les recherches indiquent qu'elle conserverait ce statut dans la phase chronique (Kashluba et al., 2004; Norrie et al., 2010). Trois mois après le trauma, environ 28% des individus rapporteraient toujours de la fatigue (Mollayeva et al., 2014) et cette dernière serait l'un des symptômes les plus persistants à la suite d'une commotion cérébrale (Kashluba et al., 2004). D'ailleurs, la gravité de la fatigue à 1 semaine ou 3 mois après le trauma corrèle positivement avec la gravité du même symptôme à 6 mois (Norrie et al., 2010). La gravité de la fatigue 3 mois après le trauma s'est avérée le meilleur prédicteur de la fatigue à 6 mois, expliquant à elle seule 56.7% de sa variance ; mais la fatigue serait aussi un bon prédicteur des symptômes post-commotionnels à 6 mois.

Dans un contexte collégial/universitaire où les étudiants athlètes ayant subi une commotion doivent non seulement performer dans leur discipline sportive, mais aussi maintenir leur rendement scolaire et, pour certains, travailler à temps partiel, il convient de se demander si cette charge de travail a un effet sur la prévalence et la gravité de la fatigue chez cette population. Depuis quelques années, les effets d'un effort physique modéré sur la manifestation des déficits cognitifs post-commotionnels, une forme de fatigue dont la cause est physique plus que cognitive, sont de plus en plus considérés dans le protocole de retour

au jeu (McGrath et al., 2013; Sicard, Lortie, Moore et Ellemborg, 2018). Toutefois, les conséquences d'un effort mental prolongé, à notre connaissance, n'ont pas encore été étudiées en profondeur chez les athlètes étudiants.

Mais en quoi consiste exactement la fatigue cognitive ? Comment la définir et comment se manifeste-t-elle chez les victimes de commotions cérébrales ? S'il n'existe toujours aucune définition consensuelle de la fatigue dans la littérature, l'on commence à s'entendre, du moins, sur la terminologie et la méthode à utiliser pour mieux la cerner. Dans la section qui suit, il sera question de définir la fatigue mentale à la suite d'une commotion cérébrale et de la meilleure façon de l'opérationnaliser pour une population de jeunes adultes actifs.

Une définition de la fatigue

On distingue généralement la fatigue subjective de la fatigabilité, mais aussi la fatigue centrale de la fatigue périphérique (Kluger, Krupp et Enoka, 2013) : la fatigue dite centrale aurait pour cause un dysfonctionnement du système nerveux central (SNC), alors que la fatigue périphérique proviendrait de changements physiologiques dans les muscles, la jonction neuromusculaire et les nerfs périphériques (Kluger et al., 2013). La fatigue subjective renvoie à la sensation d'épuisement des ressources mentales ou physiques par rapport à leur niveau de base, d'augmentation de l'effort, de divergence entre l'effort fourni et la performance donnée. Elle est un phénomène subjectif exprimé par un manque d'énergie ou de motivation, de la faiblesse, de la fatigabilité, une envie de dormir, l'épuisement, un sentiment de lassitude, l'ennui, l'adynamie, l'anhédonie et la perte d'appétit (Belmont, Agar, Hugeron, Gallais et Azouvi, 2006).

La fatigabilité de performance

La fatigabilité, elle, est opérationnalisée par plusieurs comme étant la diminution de la performance à une tâche cognitive donnée en fonction du temps (Kluger et al., 2013). Toutefois, une hypothèse qui revient régulièrement à travers les études sur la fatigabilité est celle de la compensation, proposée pour la première fois par van Zomerén (1984). Alors que beaucoup d'études ont échoué à trouver des différences de fatigabilité de performance évidentes entre les victimes d'un TCC et des sujets sains, plusieurs ont noté ce qui pourrait être une activité compensatoire de certaines aires cérébrales chez les victimes de TCC afin

de pallier les déficits engendrés par le trauma et ainsi préserver la performance (Kohl, Wylie, Genova, Hillary et Deluca, 2009; Liu et al., 2016; McAllister et al., 2001; Nordin et al., 2016; Ziino et Ponsford, 2006b). Selon cette hypothèse, ce mécanisme permettrait aux individus atteints d'un TCC de conserver la même performance à travers le temps, mais au prix d'un épuisement plus rapide des ressources énergétiques – une efficacité énergétique diminuée – ce qui causerait éventuellement de la fatigue.

La fatigabilité, étant logiquement la propension d'une personne à se fatiguer, comporte donc une notion d'intensité de l'activité cérébrale. Également, il est important de noter qu'un manque de résultats concernant la diminution progressive de la performance à travers le temps pourrait être dû au type de tâches utilisées et à la nature de la fatigabilité lorsqu'elle est opérationnalisée par le temps sur la tâche. À ce sujet, Van Dongen, Belenky et Krueger (2011) soulignent que si l'on s'attarde à l'évolution des temps de réponse ou du nombre d'erreurs à travers le temps, la fatigabilité de performance ne constitue pas réellement un phénomène linéaire. Ils vont jusqu'à qualifier le phénomène de « stochastique » en raison de sa faible réplicabilité (observé à l'aide d'une tâche de vigilance psychomotrice d'une durée de 10 minutes et d'un protocole de privation de sommeil). En fait, la fatigabilité serait davantage caractérisée par une augmentation progressive de la variabilité des temps de réponses et de la précision à travers le temps sur la tâche, ce qui signifie qu'en état de fatigue, un individu peut quand même réussir à bien performer, mais que sa performance sera de moins en moins stable en fonction du temps.

Dans le cas des études sur la fatigabilité chez les victimes de TCC, la plupart d'entre elles ont justement été effectuées en utilisant une tâche de vigilance psychomotrice. Compte tenu de la nature stochastique de la fatigabilité de performance, il convient de se demander si le recours à ce type de tâche sur une période de temps relativement courte par rapport aux études menées par le groupe de Van Dongen (où les sujets restaient éveillés durant 36h et devaient répondre à la tâche à chaque 2h) est approprié pour étudier la fatigue cognitive chez les victimes de TCC. En principe, les tâches de vigilance sont assez simples et sujettes à des variations aléatoires ou pseudo-aléatoires de l'intervalle inter-stimuli, ce qui pousse le sujet à porter une attention soutenue tout au long de la tâche. Le problème inhérent à ce type de tâche, c'est qu'à moins d'avoir des problèmes attentionnels évidents, l'apparition

aléatoire des stimuli doit coïncider avec les fluctuations attentionnelles, elles aussi assumées comme étant aléatoires, pour pouvoir mesurer un effet de fatigabilité de performance chez les sujets, en plus du fait que les sujets pourraient profiter d'un mécanisme de compensation cognitive, tel que proposé plus haut.

Enfin, il faut ajouter que les recherches indiquent que la fatigue cognitive influencerait davantage le contrôle cognitif que les processus plus automatiques de traitement de l'information et de réponse (Lorist et Faber, 2011) : cet effet proviendrait du fait que le contrôle cognitif implique l'inhibition d'une réponse prépotente, ce qui demande plus d'efforts que de répondre sans faire usage de cette inhibition (processus automatiques). Avec le temps sur la tâche, cette inhibition perdrait de son efficacité, laissant plus de place aux processus automatiques de traitement de l'information. Ainsi, les tâches recrutant les fonctions exécutives ou comportant des demandes attentionnelles plus élevées seraient plus appropriées pour l'étude de la fatigue, car plus à même de nécessiter un contrôle cognitif élevé et de provoquer un effet de fatigabilité de performance, mais aussi un phénomène de compensation cérébrale s'il y a lieu. C'est suivant cette logique que la tâche utilisée dans la présente étude fait appel à la flexibilité cognitive (communément appelée *Switch task* ou Paradigme de commutation de tâches) des participants, tâche déjà utilisée au sein de notre laboratoire et prouvée utile dans l'évaluation des commotions cérébrales (Sicard, Caron, Moore et Ellemberg, 2019; Sicard, Lortie, et al., 2018).

L'origine multifactorielle de la fatigue

La fatigue a une origine multifactorielle ; c'est-à-dire qu'elle semble être influencée, entre autres, par la somnolence, les troubles du sommeil, la douleur, la dépression et l'anxiété, mais aussi la consommation de médicaments (Cantor et al., 2013; Kluger et al., 2013; Mollayeva et al., 2014). Ainsi, il est difficile de déterminer si la cause de la fatigue à la suite d'un TCC est primaire (directement due au traumatisme) ou secondaire (e.g. due à la dépression ou des troubles du sommeil) non seulement parce que les causes de celle-ci peuvent être nombreuses, mais aussi parce qu'on dénote un chevauchement des différents construits : par exemple, un critère majeur du diagnostic de la dépression se trouve être la fatigue, ce qui rend la discrimination des construits plus ardue.

Fatigue subjective et performance générale

Au vu de ce qui précède, l'étude de la fatigue mentale à la suite d'un TCC peut s'avérer complexe. À cela, il faut ajouter que bien que la fatigue subjective et la fatigabilité fassent partie du même concept englobant qu'est la fatigue, ces dernières constituent des construits potentiellement indépendants. En effet, il est rare que les deux construits corrèlent, que ce soit dans l'étude des TCC en particulier (Cantor et al., 2013) ou des troubles neurologiques en général (Kluger et al., 2013). Chez les victimes de TCC légers à sévères, quelques études ont permis de trouver une corrélation entre la performance (temps de réaction ou nombre d'erreurs) et la fatigue subjective (Ashman et al., 2008; Belmont, Agar et Azouvi, 2009; Bushnik, Englander et Wright, 2008; Ziino et Ponsford, 2006a, 2006b). Cependant, les résultats de ces études suggèrent que la fatigue subjective peut corrélérer avec la performance générale, mais ne corrèle pas avec la variation de la performance à travers une tâche cognitive. Quant aux manifestations de la fatigue et son évolution, la population victime de TCC semble hétérogène sur ce point. Il serait pertinent d'approfondir la cause de cette contingence entre la fatigue ressentie et une performance moindre : une corrélation n'étant pas synonyme de causalité, il se pourrait que la faible performance de ces individus soit due à la fatigue ressentie, comme il se pourrait que la fatigue soit due à la perception constante d'une faible performance par rapport aux efforts investis au quotidien, ou bien à un phénomène compensatoire.

L'imagerie cérébrale et l'étude des TCC légers

Pour pallier la faiblesse de la relation entre les mesures comportementales et les questionnaires auto-rapportés, l'étude de marqueurs physiologiques de la fatigue semble nécessaire. Plusieurs études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) révèlent une activation plus importante de certaines aires cérébrales associées à l'attention chez les sujets ayant subi une commotion par rapport aux sujets sains (Kohl et al., 2009; Liu et al., 2016; McAllister et al., 2001) et cette différence varierait en fonction de la charge cognitive et de la durée de l'effort. Cet effet différentiel serait le signe d'un manque d'efficacité énergétique de la part des sujets ayant subi une commotion. Cependant, la plupart de ces études n'ont pas examiné en profondeur la relation entre cette activation plus

importante, la fatigue subjective ainsi que ses variables confondantes (e.g. dépression, sommeil, douleur).

L'électroencéphalographie en tant qu'outil de mesure de la fatigue cognitive

Étant relativement peu coûteuse, non invasive et offrant une excellente résolution temporelle, l'électroencéphalographie (EEG) est une méthode dont certains marqueurs physiologiques potentiels de la fatigue cognitive ont déjà été identifiés et qui permet de trouver un juste milieu entre besoins de puissance statistique et contraintes de temps et d'argent. Il sera question, dans la section suivante, de distinguer les différents patterns d'activité EEG généralement associés à la charge de travail, aux fonctions exécutives, à la fatigue cognitive et aux commotions cérébrales. Comme la présente étude utilisera un paradigme de commutation de tâches (*Switch task*), il sera également question des études EEG associées à ce type de tâche en fonction de chacune de ces variables.

L'activité EEG et la charge de travail

Tout d'abord, l'EEG est un outil pouvant servir à étudier le concept de charge cognitive (*mental/cognitive workload*), c'est-à-dire le coût en terme de ressources cognitives induit à une personne pour exécuter une tâche donnée (Hancock et Meshkati, 1988). Bien que la charge cognitive, tout comme la fatigue, soit dépendante de plusieurs facteurs tels que les différences inter-individuelles et les contraintes de la ou des tâches à exécuter, Puma, Matton, Paubel, Raufaste et El-Yagoubi (2018) rapportent deux méthodes qui sont principalement utilisées pour opérationnaliser le concept en contexte expérimental : la première revient à augmenter graduellement la difficulté d'une même tâche, alors que la seconde consiste à ajouter une ou plusieurs tâches supplémentaires, qui sont à exécuter en concomitance avec la première tâche donnée. Ces deux méthodes ont pour objectif d'augmenter les demandes attentionnelles nécessaires pour conserver une bonne performance et, concurremment, la charge cognitive. Dans la littérature en électroencéphalographie, cette augmentation des demandes attentionnelles serait associée à un pattern précis d'activité cérébrale.

L'activité thêta frontomédiane et la charge de travail

En effet, un vaste corpus d'études suggère que l'augmentation de la difficulté d'une tâche serait liée à une puissance de l'activité spectrale de la bande thêta plus importante enregistrée aux niveaux frontal et/ou pariétal. Différents types de tâches ont été utilisés dans l'étude de ce phénomène, soit des tâches de mémoire de travail (Fairclough et Ewing, 2017; Gevins et al., 1998; Jensen et Tesche, 2002; Maurer et al., 2015; Sauseng, Klimesch, Schabus et Doppelmayr, 2005), de calcul arithmétique (Ishii et al., 2014; Mizuhara, Wang, Kobayashi et Yamaguchi, 2004; Sammer et al., 2007), d'attention divisée (Fairclough et Venables, 2006; Fairclough, Venables et Tattersall, 2005; Puma et al., 2018; Ryu et Myung, 2005) et des paradigmes de commutation de tâches ou *task-switching* (Cooper et al., 2019; Sauseng et al., 2006). La portée vraisemblablement très étendue de ce pattern d'activation a d'ailleurs poussé plusieurs chercheurs à voir l'activité thêta, mais également l'activité alpha, dont il sera question plus loin dans ce texte, comme des processus de contrôle cognitif communs à toutes les fonctions cognitives (Cavanagh et Frank, 2014; Clayton, Yeung et Cohen Kadosh, 2015; Frey, Ruhnau et Weisz, 2015). D'après plusieurs études, la linéarité de la relation entre la difficulté d'une tâche et l'activité de la bande thêta reste toutefois sujette à débats, car le pattern d'augmentation de l'activité thêta ne suivrait pas proportionnellement l'augmentation des demandes attentionnelles. Par exemple, Fairclough et Ewing (2017) rapportent une augmentation de l'activité sur la région frontomédiane du scalp suivant une augmentation de la difficulté d'une tâche de mémoire de travail (1-back vs 4-back), mais une réduction de cette même activité lorsque les probabilités d'avoir une bonne réponse diminuent (7-back). Dans le même ordre d'idées, Itthipuripat, Wessel et Aron (2013) ont constaté une activité frontale supérieure de la bande thêta lors des essais réussis par rapport aux essais manqués lors d'une tâche de mémoire de travail. D'après plusieurs études, le générateur putatif de cette activité se trouverait être le cortex préfrontal médian (Cavanagh et Frank, 2014), en particulier dans le cortex cingulaire antérieur (Brzezicka et al., 2019; Gevins, Smith, McEvoy et Yu, 1997; Nigbur, Ivanova et Sturmer, 2011).

La synchronisation de phase de l'activité thêta et les fonctions exécutives

De plus, il faut mentionner que l'activité de la bande thêta ne dépendrait pas seulement de la charge cognitive, mais également, dans une certaine mesure, des fonctions cognitives devant être recrutées pour accomplir une tâche donnée. Notamment, un processus tel que la synchronisation de phase de la bande thêta serait particulièrement associé au recrutement des fonctions exécutives (Mizuhara et Yamaguchi, 2007; Sauseng, Hoppe, Klimesch, Gerloff et Hummel, 2007; Sauseng et al., 2005). De manière générale, la littérature sur le sujet montre que le recrutement des fonctions exécutives serait associé à un pattern de synchronisation de phase inter-régional et principalement fronto-pariétal. Mizuhara et Yamaguchi (2007), par le biais d'une tâche de calcul arithmétique et en combinant les techniques d'IRMf et d'EEG, ont pu identifier deux groupements distincts de synchronisation de phase directement associés à la complétion de la tâche par les sujets. Le premier est composé des parties frontale droite et pariétale gauche et aurait déjà été retrouvé dans des paradigmes de mémoire de travail visuelle. Le second groupement est constitué des parties frontales des deux hémisphères et de la région pariétale droite. Ce groupement a également été retrouvé dans une étude de Sauseng et al. (2005) avec une tâche nécessitant la manipulation de patterns visuels abstraits (d'après les auteurs, le calcul arithmétique utilisé pourrait présenter des demandes fonctionnelles similaires). Enfin, Sauseng et al. (2007) rapportent une synchronisation thêta frontopariétale associée à l'exécution de nouvelles séquences de mouvements des doigts par rapport à des séquences déjà apprises, indépendamment de la complexité de la séquence, alors que le pattern d'augmentation de la puissance spectrale frontomédiane de la bande thêta ne se présentait que dans la condition la plus difficile de l'étude, où les participants devaient effectuer une séquence de mouvements à la fois nouvelle et complexe. Les auteurs en ont conclu que l'attention soutenue, telle que mesurée par une activité thêta locale frontomédiane, était dissociable des fonctions exécutives, pour leur part, associées aux mesures de connectivité inter-régionale.

L'activité alpha et la charge de travail

Outre la bande thêta, la bande alpha (8 à 13Hz) serait associée aux fonctions attentionnelles. Étudiées par Hans Berger depuis les tout débuts de l'électroencéphalographie dans les

années 1920, les oscillations alpha sont connues pour prédominer sur la zone postérieure du scalp lorsqu'une personne ferme les yeux ou se trouve en état d'éveil détendu. Toutefois, en situation de demandes attentionnelles élevées ou lorsque cette même personne ouvre les yeux, un phénomène nommé « suppression (ou désynchronisation) alpha » survient : l'activité alpha se désynchronise et se trouve atténuée à la surface du scalp. Comme pour le pattern d'augmentation de la puissance de l'activité thêta, ce phénomène de désynchronisation est bien documenté et a été rapporté dans des tâches de mémoire de travail (Fairclough et Venables, 2006; Fairclough et al., 2005; Klimesch, 1999; Ryu et Myung, 2005), mais aussi dans une variété d'autres tâches (Frey et al., 2015; Klimesch, 2012). Klimesch (2012) mentionne que les oscillations alpha pourraient avoir deux rôles principaux, soit l'inhibition et la synchronisation, qui agiraient sur deux fonctions attentionnelles principales : la suppression et la sélection. Une synchronisation évoquée de l'activité alpha (*event-related synchronisation*) reflèterait une inhibition des neurones non nécessaires à la complétion d'une tâche donnée et serait donc associée à la suppression attentionnelle. La sélection attentionnelle, pour sa part, serait davantage associée à une désynchronisation évoquée (*event-related desynchronisation*). Par exemple, dans certains paradigmes attentionnels, l'ampleur d'une désynchronisation pré-stimulus (en l'absence de toute autre stimulation) est associée à la performance à la tâche. Klimesch (2012) qualifie ce phénomène d'attention anticipatoire et souligne le fait que cette capacité à produire une désynchronisation anticipée est également associée au phénomène bien connu du clin d'œil attentionnel (*Attentional blink*): une désynchronisation alpha élevée précédant le début d'une présentation visuelle sérielle rapide traduirait un surinvestissement attentionnel qui augmenterait l'effet de clin d'œil attentionnel lorsque l'intervalle entre la première cible et la seconde cible est court.

Malgré le nombre important d'études réalisées sur les oscillations alpha depuis les débuts de l'électroencéphalographie, leur analyse demeure complexe en raison des méthodes utilisées et des spécificités inhérentes à cette bande de fréquence, telles que notées par Klimesch, Schack et Sauseng (2005) : tout d'abord, les auteurs mentionnent qu'un phénomène temporel comme la réinitialisation de phase (ou *phase resetting*) n'est généralement pas considéré lorsqu'une désynchronisation de phase est rapportée, puisque la méthode la plus couramment utilisée dans la littérature est l'analyse spectrale. De plus,

l'étendu des fréquences de la bande alpha est hétérogène et existe dans une variété de rythmes et de topographies différentes. Également, une grande variation inter-individuelle dans l'étendu de la bande alpha pourrait masquer des résultats dans les études qui n'en tiennent pas compte. Finalement, la réactivité des oscillations alpha de basse fréquence (8 à 10.5Hz) est différente de celle des alphas à fréquence élevée (10.5 à 13Hz) : il a été avancé que l'activité au niveau de la bande alpha 1 serait topographiquement plus étendue que pour la bande alpha 2 et diminuerait de façon uniforme en fonction du niveau de demandes attentionnelles (Klimesch, 1999). Cependant, Fairclough et Ewing (2017) ont tout de même observé une diminution uniforme de l'activité spectrale des deux bandes lors d'une tâche de mémoire de travail. Ils rapportent que les résultats différents obtenus par Klimesch (1999) pour la bande alpha 2 pourraient être expliqués par un traitement sémantique, en raison de la nature verbale de la tâche utilisée par ces derniers.

L'activité cérébrale lors du paradigme de Task-Switching

Une définition du *task-switching*

La commutation de tâches, plus communément appelée *task-switching*, est un paradigme au sein duquel le participant doit répondre, en fonction d'un indice décisionnel qui précède ou accompagne chaque essai, à deux tâches de discrimination ou plus qui alternent ou se répètent. Ces différentes tâches partagent généralement le même mode de réponse (p. ex. appuyer sur le bouton droit ou sur le bouton gauche) et, indépendamment de l'indice décisionnel, la réponse à chaque stimulus peut être basée sur une tâche ou l'autre. Par exemple, un carré bleu est le résultat d'une combinaison de deux caractéristiques pouvant chacune être sujette à une tâche de discrimination différente : la forme et la couleur. Ainsi, l'intérêt du paradigme de *task-switching* repose sur l'interférence causée par les différentes règles de discrimination auxquelles le participant doit répondre. Cette interférence est mesurable par une augmentation des temps de réponse et/ou une augmentation du nombre de réponses erronées lorsqu'un sujet doit passer d'une tâche à l'autre. Généralement, deux indices d'interférence, communément appelés « *switch costs* », sont calculés à partir des données obtenues : le premier, le coût global (*global switch cost*), est la différence entre la moyenne des temps de réponse des essais de la condition hétérogène (la condition comprenant le *task-switching*) et celle des conditions

homogènes (lorsque chaque tâche est accomplie de façon isolée). Le second indice, le coût local (*local switch cost*), est calculé à partir de la condition hétérogène et consiste en la différence entre la moyenne des temps de réponse des essais où la tâche devant être répondue change (essais *switch*) et celle des essais où une même tâche doit être répétée après y avoir tout juste répondu (essais *non-switch*).

Les fonctions cognitives recrutées lors du *Task-Switching*

La question à savoir quelles fonctions cognitives spécifiques sont recrutées par ce type de tâches est encore débattue. Worringer et al. (2019) rapportent que deux écoles de pensée s'affrontent à ce sujet : l'une défendant l'idée que des processus de traitement de bas niveau (*bottom-up*) seraient à l'origine du coût local lors des essais *switch*, l'autre postulant qu'un contrôle cognitif additionnel (*top-down*) de reconfiguration des ensembles de règles (*task-sets*) en serait plutôt la cause. Cette hypothèse du contrôle cognitif additionnel est appuyée par des études montrant une activation cérébrale exclusivement associée à la commutation, et ce, dans des aires généralement associées aux fonctions exécutives (Barber et Carter, 2005; Chiu et Yantis, 2009; Kimberg et al. 2000; Goffaux et al. 2006; Jamadar et al. 2010a; Kieffaber and Hetrick 2005; Poulsen et al. 2005). D'après Diamond (2013), le paradigme de *task-switching* peut être utilisé pour mesurer la flexibilité cognitive, mais cette même fonction dépendrait des capacités d'inhibition (ou contrôle d'interférence) et de la mémoire de travail. L'implication d'une forme d'inhibition dans le *task-switching* est par ailleurs appuyée par le phénomène d'inhibition rétrograde (*backward inhibition*) : dans un protocole à trois tâches (A,B et C), la présentation des tâches dans l'ordre ABA est associée à un coût local plus élevé pour le dernier stimulus que dans une présentation selon l'ordre CBA (Mayr et Keele, 2000; Philipp et Koch, 2006). L'explication proposée pour cet effet est qu'en répondant à la tâche B, l'ensemble de règles de la tâche précédente (A) est inhibé et que cette inhibition persisterait jusqu'à la présentation subséquente de la tâche A. Cet effet dépendrait aussi de la dominance de la tâche : Jost, Hennecke et Koch (2017) ont montré que lorsque la réponse de la tâche A est mappée à l'emplacement du stimulus (réponse à droite lorsque le stimulus apparaît à droite et inversement pour la gauche), l'effet d'inhibition rétrograde est plus important que pour les tâches dont la réponse n'a aucun lien évident avec le stimulus. Toutefois, il faut noter que la diversité des tâches utilisées dans le *task-switching* complexifie l'interprétation des résultats des études qui l'utilisent :

les tâches peuvent être divisées en trois types principaux, tous associés à différents types d'interférence.

Trois types de *Switch*

À travers la littérature, trois principaux types de *task-switching* sont utilisés (Kim, Cilles, Johnson et Gold, 2012): le changement perceptuel, le changement de réponse et le changement contextuel. Le changement perceptuel signifie que les règles des tâches à commuter se basent toutes sur les caractéristiques des stimuli. Par exemple, le participant doit répondre en fonction de la couleur du stimulus pour la tâche A (appuyer à gauche lorsque le stimulus est bleu; à droite lorsqu'il est vert), mais en fonction de sa forme pour la tâche B (appuyer à gauche s'il s'agit d'un cercle; à droite s'il s'agit d'un carré). Le changement de réponse, au contraire, suppose une inversion des réponses en fonction de l'indice décisionnel. Comme dans l'exemple précédent, le participant pourrait répondre en fonction de la couleur pour la tâche A (bleu à gauche; vert à droite), mais devrait alors inverser sa réponse pour la tâche B (bleu à droite; vert à gauche). Enfin, le changement contextuel suppose une commutation non-indicée d'ensembles de règles, pouvant être suivi par un feedback positif ou négatif qui permet au participant d'induire à quelle règle il doit répondre (le *Wisconsin Card Sorting Test* est un exemple de paradigme de changement contextuel). Dans une méta-analyse basée sur des données d'IRMf, Kim et al. (2012) ont montré que ces trois types de *task-switching* peuvent également être dissociés par rapport à leurs corrélats neuronaux et que, tout dépendant de la tâche utilisée, les fonctions exécutives pourraient y être recrutées différemment. Si l'activation de certaines aires cérébrales est commune aux trois types de *task-switching* (la jonction frontale inférieure et le cortex pariétal postérieur), le changement de réponse et le changement contextuel seraient davantage associés à l'activité du cortex préfrontal dorsolatéral, et ce, probablement parce que ces versions nécessitent un plus grand niveau de manipulation des règles en mémoire de travail. Enfin, lorsqu'on le compare aux deux autres types de *task-switching*, le changement contextuel est particulièrement associé à l'activité du cortex frontopolaire.

Deux types de contrôle

Sur le plan temporel, deux types de contrôle cognitif sont différenciables dans le paradigme de *task-switching* : le contrôle proactif et le contrôle réactif. Le contrôle proactif signifie que le participant possède suffisamment d'information pour savoir à quelle tâche répondre avant même l'apparition du stimulus. Une telle préparation devient possible si un indice précède chaque stimulus ou si l'ordre de complétion des tâches est donné à l'avance (p. ex. AABBA). Le contrôle réactif, pour sa part, signifie que le participant ne peut savoir à quelle tâche répondre qu'au moment de l'apparition du stimulus. Le modèle du contrôle cognitif à double mécanismes (*dual-mechanisms framework*) (Braver, 2012) a pour postulat que ces deux types de contrôle peuvent être différenciés en comparant les versions de *task-switching* et les patterns d'activation cérébrale auxquels ils sont associés. D'après ce modèle, l'implication du système dopaminergique ne serait pas la même pour le contrôle proactif que pour le contrôle réactif : le contrôle proactif devrait être associé à une activation plus importante du cortex préfrontal latéral en raison des demandes de maintien actif des buts de la tâche jusqu'à la présentation du stimulus. Le contrôle réactif, lui, devrait être associé à une activation transitoire du cortex préfrontal latéral, mais combinée à un réseau d'activation plus étendu. Les deux systèmes de contrôle suggérés par ce modèle pourraient être semi-indépendants, dans la mesure où ils ne s'activeraient pas en même temps et que l'implication du premier (contrôle proactif) influencerait le recours au second (contrôle réactif). Autrement dit, plus une personne est préparée à répondre à un stimulus, moins elle a besoin d'y réagir en termes de contrôle cognitif une fois que ce dernier apparaît. Des différences d'activation allant dans le sens de ce modèle ont été obtenues par Sohn, Ursu, Anderson, Stenger et Carter (2000), qui ont montré que l'activité du cortex préfrontal latéral inférieur (aires BA45/46) était associée négativement au temps de réaction en condition de contrôle proactif, alors que l'activité du cortex préfrontal supérieur (aire BA08) présentait une corrélation positive avec le temps de réponse en condition de contrôle réactif. En d'autres mots, il semble que l'activation du cortex préfrontal soit associée au niveau de préparation pour le contrôle proactif, alors qu'elle est plutôt indicatrice du niveau d'interférence en condition de contrôle réactif. Enfin, les chercheurs ont également trouvé que l'activation du cortex pariétal était plus étendue lors du contrôle réactif.

Des résultats comparables ont aussi été obtenus en EEG. Eschmann, Bader et Mecklinger (2018), en utilisant une tâche nécessitant un contrôle proactif (tâche de mémoire de travail visuelle) et une tâche de contrôle réactif (tâche de Stroop), ont montré que l'activité thêta était topographiquement plus focalisée sur la région frontomédiane lors du contrôle proactif que pour la tâche de Stroop. Avec un protocole de contrôle réactif, Sauseng et al. (2006) ont montré que les essais *switch* présentaient une puissance spectrale plus grande sur la région centrale droite du scalp pour la bande thêta ainsi qu'une synchronisation de phase inter-régionale (fronto-occipitale, frontopariétale, frontotemporale) étendue et prononcée par rapport aux essais de répétition. Ils présentaient également une puissance spectrale diminuée de la bande alpha supérieure (10-13Hz) au niveau des sites occipitaux, que les chercheurs ont attribué au traitement sémantique effectué au cours de la tâche (Klimesch, 1999).

À l'aide d'un savant design de *switch-tasking*, Cooper et al. (2015) ont pu comparer les deux types de contrôle en utilisant trois tâches à commuter et quatre types d'indices pré-stimulus : les indices *switch-to* indiquaient exactement quelle serait la prochaine tâche; les indices *switch-away* indiquaient qu'il y aurait commutation, sans spécifier à quelle tâche il faudrait répondre; les indices de répétition indiquaient que la même tâche devrait être répétée les indices non-informatifs, eux, indiquaient qu'une répétition ou une commutation étaient équiprobables. Les chercheurs ont obtenu des différences de synchronisation de phase sur deux bandes de fréquences en fonction du type d'indice utilisé et du temps. En premier lieu, ils ont pu identifier deux réseaux pour la bande thêta. Le premier est un réseau topographiquement étendu, connectant les sites fronto-centraux et pariéto-occipitaux suivant seulement la présentation des indices *switch-to* et *switch-away* et précédant l'apparition du stimulus. Le second réseau se manifeste après l'apparition du stimulus pour les indices non-informatifs et *switch-away*, le contrôle réactif étant associé à des connexions antéro-postérieures étendues. En second lieu, des différences de synchronisation pour la bande alpha-2 ont été trouvées seulement après la présentation du stimulus. Pour les essais *switch-to* et *switch-away*, mais plus étendues pour *switch-to*, les chercheurs ont trouvé des connexions interhémisphériques frontales et frontocentrales. Pour les essais *switch-away* et non-informatifs, un pattern de connexions entre sites pariéto-occipitaux et centropariétaux était discernable.

Pour conclure, de tels résultats montrent que tout dépendant du type de contrôle recruté lors d'une tâche, l'activité cérébrale mesurée variera en termes de présentations temporelle et topographique. Il est à noter que ces différences ne seraient pas qu'attribuables au fait d'être informé ou non sur la tâche qui suivra. De façon comparable à l'étude d'imagerie fonctionnelle de Sohn et al. (2000) mentionnée plus haut, une étude plus récente montre qu'en isolant la composante proactive de la composante réactive de la tâche, on remarque que non seulement l'activité thêta frontomédiane est positivement associée à la charge de travail, mais qu'elle est aussi spécifiquement associée à la performance lors des essais *switch* indicés (Cooper et al., 2019). Une autre étude (Mansfield, Karayanidis et Cohen, 2012) utilisant le même type de *task-switching* et comparant les essais informatifs (*switch-to*, *switch-away*, répétition) par rapport aux essais non-informatifs, a montré que l'activité alpha préparatoire suivant les indices *switch-to* et *switch-away* était elle aussi distinguable sur les plans temporel et topographique et potentiellement attribuable à l'inhibition de la tâche qui vient d'être répondue. Finalement, les résultats obtenus avec les indices *switch-away* montrent qu'il est possible de recruter conjointement le contrôle proactif et le contrôle réactif dans un même essai.

La signature EEG de la fatigue cognitive

Dans cette section, il sera question des liens entre la charge cognitive et la fatigue cognitive, afin de mieux comprendre comment se manifeste cette dernière et quels marqueurs EEG peuvent être utilisés pour l'étudier de façon fiable.

Tout d'abord, à travers la littérature, une diminution du niveau d'éveil est souvent associée à l'activité de la bande thêta (Lafrance et Dumont, 2000) en situation de privation de sommeil. De façon comparable au pattern d'activité thêta obtenu en situation de charge de travail élevée, la puissance spectrale de la bande thêta captée au niveau de la région frontomédiane tend à augmenter en fonction du temps passé sur la tâche lors d'un effort cognitif soutenu (Barwick, Arnett et Slobounov, 2012; Boksem, Meijman et Lorist, 2005; Gevins et al., 1997; Lorist et al., 2009; Shou et Ding, 2013; Trejo, Kubitz, Rosipal, Kochavi et Montgomery, 2015; Wascher et al., 2014). Pour sa part, l'activité alpha associée au temps passé sur la tâche présente un pattern différent à celui normalement observé en situation de charge cognitive élevée. En effet, l'activité de la bande alpha a tendance à

augmenter, plusieurs auteurs notant même une antériorisation de l'activité alpha prédominante, passant des sites occipitaux aux sites pariétaux (Barwick et al., 2012; Gevins et al., 1997; Rosipal, Trejo et Zaidel, 2013; Trejo, 2011; Wascher et al., 2014; Zaidel et al., 2013). Wascher et al. (2014) ont fait compléter une tâche de congruence stimulus-réponse (*Simon task*) à des participants durant un total de 4 heures. Ils ont montré que le taux d'erreurs augmentait significativement à travers les 8 blocs de 25 minutes et qu'il corrélait positivement avec une augmentation de l'activité thêta frontocentrale en fonction du temps. Cette activité thêta était également plus élevée pour les essais incongruents que pour les essais congruents, mais la taille de cet effet n'était pas influencée par le temps sur la tâche. L'augmentation de cette activité corrélait positivement avec le taux d'erreurs et les analyses temps-fréquence montraient que l'activité thêta induite suivant l'apparition de la cible diminuait au fil des blocs en plus de corrélait positivement avec le taux d'erreur. Les changements encourus sur la bande alpha au fil de la tâche, pour leur part, étaient moins constants : les chercheurs ont pu observer une augmentation graduelle de la puissance spectrale lors de la première heure avant qu'elle ne stagne. D'après la prémisse selon laquelle la fatigue est un phénomène graduel et cumulatif, les chercheurs en ont conclu que la bande thêta était vraisemblablement la meilleure indicatrice du développement de la fatigue cognitive. Selon eux, l'activité thêta induite pourrait être un indicateur physiologique de l'épuisement des ressources cognitives, alors que l'augmentation de la puissance spectrale totale à travers les blocs pourrait indiquer une augmentation concomitante de l'effort pour préserver une performance adéquate. Toutefois, la tâche comportait un niveau d'interférence relativement bas et était propice à ennuyer et diminuer le niveau d'éveil des participants, ce qui pourrait agir comme variable confondante et expliquer les résultats moins clairs obtenus sur la bande alpha.

Afin d'étudier le développement de la fatigue mentale lors de tâches cognitives, les tâches à privilégier seraient celles nécessitant une forte demande attentionnelle. Tout d'abord, elles permettraient de préserver un niveau d'éveil élevé tout au long de la passation du test, donc de dépléter plus rapidement les ressources attentionnelles qu'avec des tâches plus simples à réaliser ou présentant une contrainte temporelle moins grande (Borrigan, Slama, Bartolomei et Peigneux, 2017; Käthner, Wriessnegger, Müller-Putz, Kübler et Halder, 2014; O'Keeffe, Hodder et Lloyd, 2019). Ensuite, d'après certains chercheurs, les

fonctions cognitives les plus sensibles à la fatigue seraient celles de haut niveau, autrement dit les fonctions exécutives (Lorist, 2008; van der Linden, Frese et Meijman, 2003) ou l'attention sélective (Faber, Maurits et Lorist, 2012; Trejo et al., 2015). Par exemple, Boksem et al. (2005) ont mené une étude sur la fatigue cognitive auprès de sujets sains, dans laquelle les participants devaient compléter durant 3h une tâche d'attention visuelle qui leur demandait de retenir un total de deux cibles en mémoire et de répondre lorsque l'une des cibles apparaissait dans une diagonale « pertinente » précédemment indiquée. Non seulement les chercheurs ont constaté une diminution significative de la performance des sujets à la tâche ainsi qu'une augmentation de l'activité thêta fronto-pariétale et de l'activité alpha 1 au niveau pariétal (qui corrélait avec une augmentation de l'aversion à la tâche), mais ils ont également trouvé une diminution significative de l'amplitude de la composante de potentiel évoqué N1 (qui reflète un processus d'allocation attentionnelle de base) en fonction du temps sur la tâche et une diminution de la différence entre la composante N2b (qui reflète le traitement d'une information nécessitant une réponse) générée par les stimuli pertinents et celle générée par les stimuli non pertinents. Les chercheurs ont interprété ces résultats comme étant le signe d'un effet particulier de la fatigue sur l'attention dite de haut niveau (*top-down*), c'est-à-dire qu'elle réduirait la capacité d'inhibition des stimuli non pertinents, mais aussi la capacité de focaliser l'attention à un emplacement jugé pertinent pour répondre correctement à la tâche.

Fatigue cognitive, task-switching et EEG

Le lien entre la fatigue cognitive, les fonctions exécutives et l'attention de haut niveau a été par ailleurs testé dans plusieurs études à l'aide du paradigme de *task-switching*, certaines se basant exclusivement sur des données comportementales, d'autres utilisant également l'EEG. Tout d'abord, van der Linden et al. (2003) ont montré qu'à la suite de la complétion du test des figures de Raven (d'une durée de 30 minutes dans ce cas) et d'une autre tâche consistant à remplir durant 2 heures des horaires de travail fictifs selon des contraintes qui changeaient à chaque mise en situation, les participants se sentaient davantage fatigués et effectuaient plus d'erreurs de persévérance et un temps de réponse moindre lors de la recherche de la règle à la WCST (changement contextuel) que des participants témoins qui n'avaient pas eu à compléter la tâche de 2 heures. Les chercheurs ont donc proposé l'hypothèse que dans le cadre de cette tâche, la fatigue pourrait induire

un manque de flexibilité cognitive et un recours à un processus décisionnel plus automatique.

Plukaard, Huizinga, Krabbendam et Jolles (2015) ont, quant à eux, utilisé une combinaison de différents types de tâches (calcul arithmétique durant 15 minutes; séquences arithmétiques et syllogismes durant 15 minutes; tâche de Stroop informatisée durant 10 minutes; tâches 2-back et 3-back durant 20 minutes) afin de manipuler le niveau de fatigue, puis une tâche *Switch* de changement de réponse et de contrôle réactif. Ils ont découvert que comparés à des participants témoins ayant consulté des magazines durant 60 minutes, ceux ayant complété les différentes tâches présentaient un temps de réponse moyen plus élevé dans les essais *switch* et les essais de répétition. De plus, le groupe expérimental présentait une asymétrie au niveau du *switch cost*, autrement dit des temps de réponse plus élevés lors des essais *switch* qui passent de la tâche difficile (réponse inversée) à la tâche facile (réponse suivant la direction des flèches) que lorsqu'il faut passer de la tâche facile à la tâche difficile. Cet effet combiné de commutation et de congruence a été interprété par les auteurs comme étant le signe d'une persistance de l'inhibition de la tâche la plus facile ou à un effet d'amorçage de la tâche la plus difficile. Le fait que cet effet se soit seulement manifesté chez le groupe expérimental indiquerait donc une réduction des capacités cognitives qui augmenterait le temps nécessaire pour faire preuve de flexibilité à la suite d'un essai difficile. Autre fait intéressant : le niveau de fatigue ressentie par les participants au cours des derniers jours corrélait positivement avec la taille du *switch cost*, indépendamment du groupe auquel ils appartenaient.

Dans une étude EEG utilisant une tâche de changement perceptuel et de contrôle proactif d'une durée de 2h00, Lorist et al. (2009) ont montré une augmentation progressive de la puissance spectrale sur l'ensemble des bandes de fréquences, indépendante du type d'essai (essais de répétition ou essais *switch*). Cette augmentation n'était associée ni à la motivation (puisque une manipulation de la motivation extrinsèque à la fin de la tâche n'a rien changé à l'activité captée par les électrodes), ni à une augmentation de l'efficacité (puisque les temps de réponse, les scores d'aversion à la tâche et le nombre d'erreurs ont tous augmenté au cours de la tâche). De plus, les chercheurs ont pu mesurer une cohérence thêta frontopariétale semblable à celle obtenue dans les études mentionnées précédemment

dans la section traitant de la charge de travail et du paradigme de *task-switching*. En analysant les données, ils ont montré que cette cohérence augmentait en fonction du temps sur la tâche, indépendamment du type d'essai.

Pour résumer, la fatigue mentale est généralement associée à un ralentissement de l'activité cérébrale tel que mesuré par une augmentation de la puissance spectrale sur les bandes thêta et alpha, ainsi qu'avec certaines composantes de potentiels évoqués. Même si en théorie la fatigue mentale peut être générée par n'importe quelle tâche demandant un minimum de ressources cognitives, les recherches sur le sujet indiquent que l'approche à préconiser pour la générer et la mesurer en un minimum de temps est l'utilisation de tâches recrutant les fonctions exécutives. Trejo et al. (2015) rapportent par exemple qu'avec une tâche de calculs arithmétiques, 60 minutes sont nécessaires pour que les sujets soient substantiellement fatigués, mais que des signes de fatigue physiologiques sont déjà présents à partir de 15 à 30 minutes. En ce qui a surtout trait à mesurer la fatigue mentale, le paradigme de *task-switching* a été utilisé avec un certain succès dans quelques études (Lorist et al., 2009; Plukaard, Huizinga, Krabbendam et Jolles, 2015; van der Linden et al., 2003). Évidemment, la variété des tâches utilisées rend ardue la formulation d'hypothèses, mais on remarque à travers les trois études une diminution générale de la performance ainsi qu'une augmentation générale de la puissance spectrale et de la cohérence de la bande thêta en fonction du temps passé sur la tâche. Une seule étude montre une interaction entre le *switch cost* et le temps sur la tâche (Plukaard et al., 2015), mais il faut préciser que l'étude de Lorist et al. (2009), elle, était basée sur le contrôle proactif, ce qui pourrait expliquer les différences entre les résultats.

Les conséquences des commotions cérébrales sur la fatigabilité cognitive

Données comportementales et auto-rapportées

Plusieurs études basées sur des données comportementales ou comprenant des questionnaires auto-rapportés suggèrent qu'une atteinte à long terme des fonctions exécutives (1 mois et plus après le trauma) pourrait être une conséquence des commotions cérébrales (Bernstein, 2002a; Halterman et al., 2006; Mayr et al., 2014; Sicard et al., 2019; Sicard, Moore et Ellemberg, 2018; Tapper, Gonzalez, Roy et Niechwiej-Szwedo, 2017;

van Donkelaar et al., 2005; Vynorius, Paquin et Seichepine, 2016) ou aussi plus généralement des chocs répétés à la tête (Montenigro et al., 2017). Parmi les études sur le sujet, le paradigme de *task-switching* a été utilisé à quelques reprises. Une étude sur la variabilité intra-individuelle (VII) a montré que parmi trois tâches supposées recruter des fonctions exécutives distinctes (inhibition, mémoire de travail et flexibilité), celle recrutant la flexibilité cognitive est la seule pouvant prédire le nombre de commotions subies car la VII y était positivement associée (Karr, Garcia-Barrera et Areshenkoff, 2014). Dans le cadre de cette étude, le paradigme de *task-switching* utilisé en était un de changement perceptuel et de contrôle réactif. Un point important à souligner est qu'il s'agissait de la dernière tâche d'une batterie qui durait 45 minutes au total. Les chercheurs mentionnent donc que la fatigue générée par la batterie, mais aussi la plus grande difficulté du *task-switching* par rapport aux deux autres tâches, pourraient jouer un rôle dans les résultats obtenus. Dans une autre étude utilisant un paradigme de *task-switching* à deux versions (spatiale et non-spatiale) de changement perceptuel et de contrôle proactif, des participants ayant subi une commotion cérébrale présentaient un *local switch cost* plus grand que les sujets témoins (Mayr et al., 2014). Les sujets étaient testés à 4 reprises, soit 48h, 7 jours, 14 jours et 28 jours après la commotion, mais l'absence d'interaction *Groupe x Temps* révèle que malgré la présence d'un effet de pratique chez les deux groupes, les différences de *switch cost* perduraient encore 1 mois après l'incident.

Comment se manifestent les différences au niveau des fonctions exécutives et du *task-switching* sur le plan physiologique ?

Tout d'abord, dans les 30 jours suivant un TCC léger, on peut constater une activité cérébrale anormale au niveau des basses fréquences (Dunkley et al., 2015), elle-même associée aux symptômes de dépression, d'anxiété ou aux scores d'inattention. En effet, la puissance spectrale temporelle et sous-corticale des bandes thêta et alpha et la connectivité inter-régionale des bandes delta, thêta et alpha sont accrues au repos lorsqu'on les compare à celles de sujets témoins. Guay, De Beaumont, Drisdelle, Lina et Jolicoeur (2018) ont mesuré, en contexte d'effort cognitif, une désynchronisation alpha occipitale réduite auprès d'athlètes avec un historique de commotions multiples lors d'une étude d'attention visuelle, cette dernière étant associée à une composante P3 moins ample ainsi qu'au nombre de commotions subies. Ces résultats, ainsi que l'absence de différences au niveau

de la performance, laissent penser qu'une activité compensatoire permettrait aux sujets de conserver une performance adéquate malgré une altération de l'attention sélective. Plusieurs autres études ont aussi fait état d'une amplitude moins élevée de la P3 chez les individus ayant souffert de commotions multiples (Broglia et al., 2009; De Beaumont et al., 2007; Gaetz et al., 2000; Gosselin et al., 2006; Theriault et al., 2009). C'est aussi le cas d'une étude sur la mémoire de travail menée auprès de sujets ayant subi une commotion cérébrale un minimum d'un an auparavant et de sujets témoins n'ayant jamais subi de commotion (Ozen, Itier, Preston et Fernandes, 2013). Les sujets avec un historique de commotion présentaient une P3 significativement moins ample pour toutes les conditions (0-back, 1-back, 2-back, 3-back) que les sujets témoins et, pour les deux groupes, l'amplitude de la P3 diminuait si la charge de travail était incrémentée et corrélait négativement avec les temps de réponse pour les conditions les plus difficiles (2-back et 3-back). Les auteurs en ont conclu que cette P3 réduite reflétait un manque d'efficacité dans l'utilisation des ressources pour accomplir une même tâche, mais que les capacités compensatoires de la population à l'étude (jeunes adultes aux études) n'avaient visiblement pas atteint leur limite dans la condition 3-back, car aucune différence de performance entre les groupes n'était notable pour les quatre conditions. Une telle absence de différences au niveau de la performance, avec des signes d'inefficacité dans l'utilisation des ressources en fonction de la charge de travail, sont corroborés par des études en IRMf menées auprès de patients victimes d'un TCC léger (McAllister et al., 1999; McAllister et al., 2001) au cours du mois suivant l'incident, mais aussi 1 an après, tel que mesuré chez un sous-groupe asymptomatique des participants de l'une des études (McAllister et al., 2002). Ces études montrent des différences d'activation au niveau des régions pariétale à court terme et frontale à plus long terme, mais suggèrent également que les sujets TCC pourraient atteindre leur limite d'efficacité plus tôt que les sujets sains.

Certains résultats obtenus en magnétoencéphalographie (MEG) montrent que dans les deux mois suivant un TCC léger, on note une flexibilité cognitive réduite (da Costa et al., 2015; Pang, Dunkley, Doesburg, da Costa et Taylor, 2016) particulièrement lorsque la personne doit effectuer une commutation extra-dimensionnelle plutôt qu'une commutation intra-dimensionnelle. Une commutation extra-dimensionnelle implique un changement attentionnel d'une dimension perceptuelle à une autre (p. ex. porter l'attention sur la

couleur des stimuli, puis sur la forme), alors qu'une commutation intra-dimensionnelle implique un changement attentionnel à l'intérieur d'une dimension (p. ex. porter l'attention sur un changement de couleurs d'un essai à l'autre), ce qui est considéré plus facile à exécuter. Ce manque de flexibilité se manifeste par une désorganisation temporelle et spatiale de l'activité cérébrale qui serait en partie attribuable à un manque de synchronisation neuronale et à une activité compensatoire (da Costa et al., 2015), ainsi qu'une connectivité alpha inter-régionale diminuée (Pang et al., 2016). Pour leur part, Barlow, Medrano, Seichepine et Ross (2018) ont obtenu des résultats en EEG avec des sujets dont le dernier TCC léger remontait à plus de un mois, trouvant une performance générale et une désynchronisation alpha et bêta pariétale diminuées, ainsi qu'une désynchronisation thêta augmentée par rapport à des sujets témoins (*task-switching* perceptuel; contrôle proactif), qui peut être indicatrice d'une mauvaise préparation en situation de contrôle proactif. Au vu des résultats obtenus, les chercheurs ne pouvaient conclure à des différences spécifiques à la flexibilité cognitive, mais soulignent qu'une désynchronisation alpha pariétale diminuée pourrait être le signe d'un changement dans la capacité à biaiser l'information vers un ensemble de règles donné.

Liens entre commotions cérébrales, fonctions exécutives et fatigabilité cognitive

Au vu de ce qui précède, les personnes avec un historique de commotions cérébrales montreraient, en l'absence ou non de différences sur le plan comportemental, des perturbations de l'activité de certaines bandes de fréquences (delta, thêta, alpha et bêta) et du réseau attentionnel frontopariétal, indicatrices d'atteintes au niveau de l'attention sélective, de la mémoire de travail et de la flexibilité cognitive (Barlow et al., 2018; Dunkley et al., 2015; Guay et al., 2018; Pang et al., 2016). Ces perturbations seraient modulables en fonction de la charge de travail et seraient un indice de diminution dans la capacité générale à traiter des informations importantes par rapport à des informations moins importantes en effectuant le moins d'efforts possible, c'est-à-dire une efficience réduite du contrôle cognitif. Or, on ne peut que constater l'apparent chevauchement entre ces résultats et la signature physiologique ou comportementale de la fatigabilité cognitive. Elle aussi associée à des changements d'activité au niveau des basses fréquences en EEG et en MEG, la fatigabilité cognitive se caractérise par une diminution progressive du

contrôle cognitif par rapport aux mécanismes plus automatiques de traitement de l'information et de réponse. Ce changement est, lui aussi, influencé par la charge cognitive. Enfin, la fatigue cognitive est aussi associée à une augmentation répandue, à l'ensemble du cerveau, de la connectivité inter-régionale, dont le réseau attentionnel frontopariétal associé au recrutement des fonctions exécutives (Lorist et al., 2009). Malheureusement, peu d'études ont été réalisées sur la fatigabilité chez les victimes de TCC (Ashman et al., 2008; Azouvi et al., 2004; Beaulieu-Bonneau, Fortier-Brochu, Ivers et Morin, 2015; Belmont et al., 2009; Ziino et Ponsford, 2006b), et encore moins en imagerie cérébrale (Kohl et al., 2009; Liu et al., 2016; Nordin et al., 2016). Étudier plus en profondeur ce phénomène chez les individus ayant subi une commotion cérébrale récemment, mais aussi chez ceux ayant un historique de multiples commotions, pourrait permettre d'en apprendre davantage sur les conséquences chroniques des commotions cérébrales et sur leur mécanisme sous-jacent.

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) en tant qu'indicateur du fonctionnement du cortex préfrontal

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) désigne les changements qui surviennent dans les intervalles inter-battements (RR) d'une personne à travers le temps. Ces changements sont modulés par le système nerveux autonome et serviraient de mesure d'équilibre et d'efficacité de ce dernier (Shaffer et Ginsberg, 2017). Dans le contexte des commotions cérébrales, le peu d'études effectuées sur le sujet suggèrent que les victimes de commotion cérébrale présentent des altérations de la VFC à l'état de repos et à l'effort physique, mais que des failles méthodologiques et l'hétérogénéité des groupes étudiés ne permettent pas de tirer de conclusions claires sur les paramètres affectés en fonction des différentes phases suivant un TCC léger (aigüe, sous-aigüe et chronique) (Bishop, Dech, Guzik et Neary, 2018). De plus, à notre connaissance, une seule étude a tenté d'étudier la VFC chez une population d'athlètes commotionnés en contexte d'effort cognitif et cette dernière porte sur la phase aigüe de la commotion : d'après Huang et al. (2018), les athlètes commotionnés présentent un pourcentage de la puissance totale attribuable aux hautes fréquences (HF; 0.15–0.4 Hz) de la VFC (%HF) plus petit au repos que les sujets témoins, mais une augmentation significative lorsqu'ils doivent compléter une tâche de mémoire de travail (*2-back*). Les sujets témoins ne présentent, quant à eux, aucun changement entre les

deux conditions sur ce paramètre. D'après La Fountaine (2018), trop peu d'études ont été effectuées sur les conséquences à long terme des commotions cérébrales sur la VFC, mais cette dernière pourrait hypothétiquement montrer des signes d'altération en raison de différences de flux sanguin cérébral et des dommages chroniques aux structures associées au contrôle du rythme cardiaque, plus spécifiquement le cortex insulaire ainsi que les neurones cholinergiques. D'ailleurs, d'après le modèle d'intégration neuro-viscérale, la VFC serait fonction de la charge de travail et de l'activation du cortex préfrontal chez les sujets sains (Thayer, Hansen, Saus-Rose et Johnsen, 2009). Ce modèle a pour prémisse que le cortex préfrontal a pour effet d'inhiber de façon tonique l'activité du système nerveux sympathique, susceptible de faire accélérer le rythme cardiaque et de diminuer la VFC. Ainsi, la VFC pourrait être utilisée comme variable de substitution pour mesurer l'activité du cortex préfrontal. Les données trouvées dans la littérature vont dans ce sens, indiquant un lien entre la VFC et les mêmes variables influençant ou influencées par le cortex préfrontal. Par exemple, les auteurs notent que d'après les études menées par leur propre groupe, une VFC élevée au repos serait associée à une bonne performance sur des tâches recrutant les fonctions exécutives. La VFC aurait aussi tendance à diminuer lors de la complétion de tâches cognitives en fonction des demandes attentionnelles ou de la sollicitation des fonctions exécutives (Luque-Casado, Perales, Cárdenas et Sanabria, 2016), ce qui, d'après le modèle d'intégration neuro-viscérale, serait provoqué par une activation supérieure du cortex préfrontal et donc une inhibition tonique augmentée. De plus, la VFC dépendrait du temps sur la tâche et de la fatigue cognitive engendrée par la tâche: certaines études montrent une augmentation de l'activité du système nerveux sympathique et une diminution de celle du système nerveux parasympathique (Mizuno et al., 2011; Zhang et Yu, 2010; Zhao, Zhao, Liu et Zheng, 2012).

Objectifs

L'objectif de cette étude sera de déterminer si des athlètes ayant subi une commotion cérébrale se sentent plus fatigués ou ont davantage tendance à se fatiguer mentalement que des athlètes n'ayant jamais subi de commotion cérébrale. Un second objectif de cette étude exploratoire sera de déterminer la faisabilité d'une étude ultérieure utilisant un protocole semblable avec un échantillon plus grand et d'orienter de futures études potentielles partageant le même objectif principal. Dans un premier temps, il sera question d'analyser les différences de manifestation de la fatigue rapportée, les symptômes de dépression, la qualité du sommeil et la somnolence chez les athlètes ayant subi une commotion cérébrale et se trouvant en phase chronique (après 2 mois au minimum) par rapport à un groupe témoin composé de sujets sains. Dans un second temps, il sera question d'analyser la relation entre la fatigue subjective et la performance moyenne, puis la fatigabilité de performance. Les deux groupes seront comparés sur la base des indices physiologiques de la fatigue proposés précédemment, soit l'interaction '*Groupe x Temps sur Tâche*' de l'activité thêta fronto-pariétale et l'activité alpha occipito-pariétale, ainsi que la VFC à titre plus exploratoire. Le critère utilisé pour déterminer la faisabilité d'une étude ultérieure sera la capacité de la présente étude à répondre à l'objectif principal, c'est-à-dire de déterminer si les athlètes victimes de commotion cérébrale se sentent plus fatigués et ont davantage tendance à se fatiguer mentalement que les athlètes n'en ayant jamais eu. Les athlètes devront donc présenter des différences aux questionnaires auto-rapportés ainsi que des différences dans la performance et au niveau de l'activité physiologique.

Hypothèses

- 1) La fatigue (fatigue quotidienne) est plus intense et plus fréquente chez les sujets ayant subi une commotion que chez les sujets sains. Ils ont également un score plus élevé aux questionnaires de symptômes de dépression et d'anxiété ainsi qu'une qualité du sommeil rapportée moins bonne et plus de somnolence.
- 2) La fatigue situationnelle subjective des deux groupes augmentera à la suite d'un effort mental intense et prolongé.
- 3) Globalement, la performance des sujets ayant subi une commotion au test cognitif (Switch) sera moins bonne que celle des sujets sains, mais on ne retrouvera pas d'interaction '*Groupe x Temps sur Tâche*'.
- 4) Malgré l'absence d'interaction mentionnée à l'hypothèse 3 en effectuant des comparaisons de groupes, une proportion plus importante de sujets ayant subi une commotion présentera une diminution de la performance à un test cognitif recrutant les fonctions exécutives (Switch) que les sujets sains, ce qui coïncidera avec une augmentation de la fatigue subjective situationnelle. Autrement dit, un sous-groupe significatif de sujets ayant subi une commotion cérébrale présentera des signes de fatigabilité cognitive, appuyant l'idée selon laquelle cette population est hétérogène.
- 5) La fatigue subjective quotidienne corrélera négativement avec la performance à la tâche pour les deux groupes.
- 6) La fatigue subjective et la performance corrélent avec la somnolence, les symptômes d'anxiété, les symptômes de dépression ainsi que les troubles du sommeil.
- 7) Les symptômes de dépression corrélent davantage avec la fatigue quotidienne des sujets sains que pour les sujets ayant subi une commotion.
- 8) En contrôlant pour les variables confondantes, la fatigue corrélera toujours avec la performance à la condition hétérogène du Switch.
- 9) L'activité thêta frontopariétale aura augmenté davantage entre la condition hétérogène du Switch-pré et celle du Switch-post chez les sujets ayant subi une

commotion que chez les sujets sains et cette augmentation sera associée à la fatigue subjective quotidienne.

- 10) Une ''antériorisation'' de l'activité maximale de la bande alpha, soit un déplacement de cette activité de la région occipitale à la région centrale du scalp, sera plus importante chez les sujets ayant subi une commotion que chez les sujets sains pour la tâche Switch hétérogène.
- 11) Une augmentation graduelle plus importante de l'activité du SNS par rapport à celle du SNP chez les sujets ayant subi une commotion cérébrale. Cette augmentation graduelle sera mesurée par une augmentation des valeurs de la variable non-linéaire SD2, représentant la VFC à long-terme et associée à l'activité du système nerveux sympathique, par rapport à la variable SD1, représentant la VFC à court terme et associée à l'activité parasympathique (ces deux variables sont abordées plus en détails dans la section « *Analyses* »).

Méthode

Participants

Ce projet de recherche a été approuvée par le comité d'éthique de la recherche clinique de l'Université de Montréal (voir Annexe R). Les participants de la présente étude ont été recrutés auprès d'équipes sportives par le biais d'annonces sur les réseaux sociaux (Annexe Q) et d'une liste de diffusion. Les volontaires devaient avoir subi leur commotion cérébrale la plus récente il y a un minimum de 2 mois à un maximum de 24 mois et avoir effectué un retour au jeu, ou bien n'avoir jamais subi de commotion cérébrale.

Les participants devaient tous avoir entre 18 et 30 ans, être étudiant au cégep ou à l'université, n'avoir aucun problème neurologique, trouble neurodéveloppemental ou problème psychiatrique diagnostiqué, aucun historique de trauma craniocérébral qui ne serait pas d'origine sportive, aucun historique de fracture du crâne, ne pas consommer de médicaments ayant des effets psychoactifs, ne pas avoir de pathologie systémique importante, n'abuser d'aucune substance, ne pas avoir subi d'anesthésie générale au cours des deux dernières années et ne souffrir d'aucun trouble important de la vision ou de daltonisme.

Suite à leur participation, les volontaires ne bénéficiaient d'aucune compensation financière, mais une collation leur était donnée à la fin pour les aider à récupérer leur énergie en cas de fatigue. Il a aussi été convenu avec eux que les résultats de l'étude leur seraient communiqués par courriel sous forme de lettre d'information.

33 participants ont été recrutés au total. Sur ces 33 participants, 4 ont refusé de se présenter à la seconde séance. Deux autres ont dû être retirés de l'échantillon car ils rapportaient au moins un événement survenu il y a plus de 2 ans, duquel on pourrait soupçonner une commotion cérébrale. Ensuite, tel qu'expliqué dans la section « *Méthode* », 1 participant a dû être retiré en raison de son score élevé au questionnaire sur les symptômes de dépression et 2 autres car leur performance à la tâche Switch était trop faible. Finalement, l'échantillon final est composé de 24 participants (12 témoins; 12 sujets avec un historique de commotion), sauf pour les mesures de variabilité de la fréquence cardiaque, où 1 participant

a été retiré pour un souffle au cœur, 1 autre pour un problème de cardiofréquencemètre survenu lors de la collecte de données et 1 dernier dont les données présentaient trop d'artefacts. L'échantillon final pour l'analyse de la VFC est donc de 21 sujets (9 témoins; 12 sujets avec un historique de commotion).

Procédure

L'étude consistait en deux séances. La première, d'une durée de 30 minutes, consistait à l'explication détaillée du projet, la signature du formulaire de consentement par le participant (Annexe A), ainsi que la complétion des différents questionnaires. Ces questionnaires servaient entre autres à évaluer si le participant répondait aux critères d'inclusion. Si le participant répondait aux critères, une deuxième séance était prévue, dédiée à l'expérimentation et d'une durée de 2h30. Advenant le cas où un participant n'avait pas le temps de se présenter à deux reprises au laboratoire, la première séance était effectuée le même jour que la deuxième séance et une courte pause servait à reposer et préparer le participant pour l'expérimentation et à vérifier que ce dernier respecte bien les critères d'inclusion. Sinon, la seconde séance devait être effectuée un maximum d'une semaine suivant la première séance.

Avant de débiter l'expérimentation, trois échelles de Likert à 11 points étaient présentées au participant afin qu'il note ses niveaux de fatigue cognitive, d'effort et de motivation. Un cardiofréquencemètre (BioHarness 3.0, Zephyr Technology, Annapolis, USA) était ensuite attaché à son torse et le filet EEG (GSN, Electrical Geodesic System Inc., Eugene, USA) placé sur sa tête (voir Annexes C et D). L'expérimentation avait lieu dans une chambre de Faraday afin de minimiser les sources de bruit électro-magnétique. Le participant était en position assise, le dos droit et la tête droite, devant un écran allumé et devait d'abord demeurer à l'état de repos, les yeux ouverts, durant 5 minutes, pendant que le cardiofréquencemètre et le logiciel de collecte de données EEG (NetStation, Electrical Geodesic System Inc., Eugene USA) enregistraient les données. À la fin de la période de repos, une seconde feuille avec les trois échelles de Likert était remise au participant afin qu'il indique encore une fois ses niveaux de fatigue cognitive, d'effort et de motivation. Ensuite, le participant devait répondre à une tâche de type Switch (changement perceptuel et contrôle réactif), d'une durée de 25 à 30 minutes. Il avait reçu la consigne de bouger le

moins possible. À la suite de cette tâche, le participant disposait d'une heure pour répondre, en ordre, au plus de questions possibles d'une épreuve de raisonnement. Pour finir, après avoir complété l'épreuve de raisonnement, le participant devait à nouveau effectuer la tâche de type Switch, cette fois-ci avec les règles de changement perceptuel inversées (expliqué dans les sections suivantes). La collecte de données EEG était effectuée au cours de la tâche Switch seulement, alors que le cardiofréquencemètre enregistrait les données durant la totalité de l'expérimentation. Les trois échelles de Likert étaient présentées à deux autres reprises au cours de l'expérimentation, soit avant et après l'épreuve de raisonnement.

Outils de mesure

Pittsburgh Sleep Quality Inventory (PSQI) et Insomnia Severity Index (ISI)

Les deux questionnaires utilisés pour mesurer la qualité du sommeil (Annexes E et F) sont l'Index de qualité du sommeil de Pittsburgh (Buysse, Reynolds, Monk, Berman et Kupfer, 1989) ainsi que l'Index de sévérité de l'insomnie (Bastien, Vallieres et Morin, 2001). Le premier dispose d'un score global compris entre 0 et 21 et 7 composantes dont le score total varie entre 0 et 3. L'alpha de Cronbach global des composantes est de 0.83, soit un degré acceptable de consistance interne. Le questionnaire possède également une bonne fidélité test-retest. Avec un score de 5 comme seuil de discrimination, il aurait une sensibilité de 89.6% et une spécificité de 86.5% pour discriminer les mauvais dormeurs des bons dormeurs. Un score élevé indique une mauvaise qualité du sommeil. Le second questionnaire, l'ISI, complète en quelque sorte le PSQI puisque ce dernier mesure la qualité subjective du sommeil, mais n'est pas une mesure précise de l'insomnie. L'étendue des scores est de 0 à 28, un score élevé signifiant des problèmes plus importants. Cet instrument possède une consistance interne adéquate et sa validité concourante a été établie en le comparant à des instruments tels qu'un journal du sommeil et des mesures de polysomnographie (Bastien et al., 2001). Un seuil de discrimination de 10 permet d'avoir une sensibilité de 86.1% et une spécificité de 87.7% (Morin, Belleville, Bédard et Ivers, 2011). De plus, l'ISI corrèle avec divers instruments mesurant la fatigue, la qualité du sommeil, la qualité de vie, les symptômes d'anxiété et ceux de dépression (Morin et al., 2011). Tel qu'expliqué dans l'introduction du présent projet de recherche, ces questionnaires sont nécessaires dans l'étude du phénomène de la fatigue puisque la qualité

du sommeil a un impact considérable sur la fatigue ressentie au quotidien, dans la mesure où un sommeil de mauvaise qualité devrait signifier une récupération altérée chez la personne fatiguée.

Epworth Sleepiness Scale (ESS)

L'échelle de somnolence d'Epworth (Annexe G) est un instrument permettant de mesurer la somnolence quotidienne (Johns, 1991). Le sujet doit répondre en indiquant (de 0 à 3) à quel point il est à risque de s'assoupir ou de s'endormir, un score élevé signifiant un risque élevé. L'alpha de Cronbach de cet outil est de 0.88; l'instrument a donc un haut niveau de consistance interne. De plus, il est sensible au traitement contre l'apnée obstructive du sommeil (Kaminska et al., 2010). Cet outil est utile à cette étude dans la mesure où il permettra, conjointement aux outils mesurant la fatigue subjective, de distinguer les construits que sont la fatigue subjective et la somnolence. En évaluant la relation entre ces deux construits, il sera possible d'analyser avec plus de précision la manifestation de la fatigue chez les deux groupes à l'étude.

Beck Depression Inventory-II (BDI-II) et Beck Anxiety Inventory (BAI)

Très utilisé en clinique et en recherche, le *Beck Depression Inventory-II* (BDI-II) (Beck, Steer et Brown, 1996) permet de mesurer la gravité des symptômes dépressifs chez les populations psychiatrique et normale (voir Annexe H). Il comprend 21 groupes de 4 énoncés (de 0 à 3), le sujet devant indiquer pour chaque groupe quel énoncé décrit le mieux sa situation des deux dernières semaines (score total variant de 0 à 63, un score élevé indiquant des symptômes plus sévères). Le BDI-II a un alpha de Cronbach moyen de .91, la fidélité interne étant excellente peu importe la population, sa fidélité test-retest est satisfaisante et il dispose d'une très bonne validité (Dozois et Covin, 2004). Le *Beck Anxiety Inventory* (BAI) (Beck, Epstein, Brown et Steer, 1988) est un inventaire servant à mesurer les symptômes d'anxiété (voir Annexe I). Sa consistance interne est forte (alpha de .92), sa fidélité test-retest au-dessus d'une semaine est de .75 et il est conçu expressément pour corrélér le moins possible avec les symptômes de dépression (BDI-II). Le BAI permet de discriminer les individus ayant un trouble d'anxiété (selon les critères du DSM-III) de ceux n'ayant aucun trouble lié à l'anxiété ou étant dépressif. La mesure des symptômes de dépression et d'anxiété est utile dans le cadre de l'étude de la fatigue,

car ces dernières peuvent être la cause de la fatigue comme sa conséquence. Par exemple, Norrie et al. (2010) ont trouvé un lien, chez des victimes de TCC légers, entre une fatigue accrue à la suite du trauma et des symptômes de dépression et d'anxiété élevés mesurés par le BDI-II et le BAI mesurés six mois après le trauma. Le lien entre la fatigue, la dépression et l'anxiété à la suite de commotions cérébrales est encore peu étudié et une division des construits pourrait certainement aider à la compréhension de leur relation.

Conners' Adult ADHD Rating Scale (CAARS)

Le *Conners' Adult ADHD Rating Scale* (CAARS) est un instrument utilisé dans la mesure des symptômes de trouble déficitaire de l'attention et de l'hyperactivité chez les adultes (voir Annexe J). Dans le cadre de notre étude, nous n'utiliserons que sa sous-échelle d'inattention. Pour les 18-29 ans, l'alpha de Cronbach de cette échelle est de .89 pour les hommes et .88 pour les femmes (Erhardt, Epstein, Conners, Parker et Sitarenios, 1999). Il a donc une consistance interne élevée. Sa fidélité test-retest est également excellente, étant de .88 à un mois d'intervalle. Finalement, le CAARS aurait une sensibilité de .82 et une spécificité de .87. Sa spécificité élevée en fait un bon instrument de contrôle pour le trouble déficitaire de l'attention. Dans la présente étude, il sera primordial d'utiliser un tel outil puisque les capacités attentionnelles seront nécessaires à la complétion de la tâche Switch et l'épreuve de raisonnement. De plus, les réseaux attentionnels seraient particulièrement affectés à la suite d'un trauma craniocérébral (Kohl et al., 2009; Liu et al., 2016; McAllister et al., 2001) et les scores au CAARS corréleraient avec la puissance spectrale des ondes lentes du cerveau (Dunkley et al., 2015). Puisque la puissance spectrale des ondes lentes est un indice de fatigabilité qui sera mesuré dans l'étude, le CAARS permettra d'établir si les résultats obtenus lors de l'étude peuvent être davantage expliqués par des déficits attentionnels que par un effet de fatigabilité.

McGill Pain Questionnaire (MCPQ)

Le Questionnaire sur la douleur de McGill (Annexe K) est un instrument permettant de quantifier la douleur ressentie par un individu (minimum = 0; maximum = 78). Il est composé de mots décrivant la douleur de différentes façons : sensorielle, affective, évaluative et mixte (sensorielle, affective et évaluative). Il dispose d'une bonne consistance interne et est sensible aux effets des traitements contre la douleur (Melzack, 1975). La

douleur est une cause secondaire de la fatigue (Kluger et al., 2013), c'est pourquoi dans le cadre de cette étude il sera important de savoir si une différence de groupes pour la fatigue subjective et la fatigabilité n'est pas plutôt expliquée par cette variable.

Échelle de gravité de la fatigue (FSS)

D'abord utilisée pour mesurer la fatigue quotidienne subjective chez les patients atteints de la sclérose en plaques (Krupp, LaRocca, Muir-Nash et Steinberg, 1989), l'échelle de gravité de la fatigue (*Fatigue Severity Scale*), visible en Annexe L, a également été utilisée dans plusieurs études portant sur les traumatismes craniocérébraux légers à graves (Mollaveva et al., 2014; Norrie et al., 2010). Contrairement à ce qu'indique son nom, elle mesure les conséquences de la fatigue plutôt que sa gravité. Bien que peu appropriée en raison des questions posées (e.g. « la fatigue est mon symptôme le plus invalidant ») à la situation des victimes de commotions cérébrales, dont seulement une minorité éprouve des difficultés à rester fonctionnelle, la fréquente utilisation de ce questionnaire dans les études portant sur cette population justifie son utilisation à titre comparatif.

Inventaire multidimensionnel de la fatigue (IMF-20)

L'IMF-20 (Annexe M) a été conçu pour mesurer 5 dimensions de la fatigue (Physique, Mentale, Niveau d'activité réduit, Motivation réduite et Fatigue générale) (Smets, Garssen, Bonke et De Haes, 1995). Bien qu'aucun barème ne soit proposé par ses auteurs et qu'il n'existe pas de données épidémiologiques canadiennes, des données épidémiologiques allemandes sont disponibles (Schwarz, Krauss et Hinz, 2003) et une version québécoise de l'instrument a été validée auprès de patients atteints du cancer (Fillion, Gelinas, Simard, Savard et Gagnon, 2003). De plus, il a été montré que les scores au IMF-20 corrélaient significativement avec l'âge et le sexe (Schwarz et al., 2003). Enfin, il a été montré que des victimes de TCC modéré à graves avaient un score significativement plus élevé à la IMF-20 que des sujets sains (Beaulieu-Bonneau et Morin, 2012).

Échelles de Likert de la fatigue, de l'effort et de la motivation

Trois échelles de Likert (Annexe N), développées par les chercheurs, sont utilisées au laboratoire, soit au début de l'expérimentation, après une période de repos de 5 minutes, après avoir complété une première fois la tâche Switch et après avoir complété l'épreuve

de raisonnement. Ces échelles auront pour fonction de mesurer les niveaux situationnels de fatigue, d'effort et de motivation du participant, c'est-à-dire comment ce dernier se sent au moment-même de la complétion des échelles. Ces échelles nous permettront non seulement de vérifier s'il y a une différence dans la manifestation de la fatigue subjective entre les groupes au cours de l'expérimentation (Ashman et al., 2008; Belmont et al., 2009; Ziino et Ponsford, 2006a, 2006b), mais également de comparer l'effort ressenti afin de tester en partie l'hypothèse d'une compensation cognitive (Azouvi et al., 2004) et de contrôler pour le niveau de motivation, puisque la performance dépendra principalement de la motivation des participants à participer activement à l'étude et que l'état de fatigue serait caractérisé par une diminution de celle-ci (Belmont et al., 2006). La décision d'utiliser des échelles de type Likert a été prise car à la connaissance des chercheurs, aucun outil couramment utilisé mesurant la fatigue subjective situationnelle n'a été traduit à ce jour en français (par exemple, la *Visual Analogue Scale of Fatigue* (Lee, Hicks et Nino-Murcia, 1991)). De plus, il n'existe en ce moment aucun outil faisant l'unanimité dans la littérature et plusieurs des outils sont composés eux-mêmes d'échelles de type Likert (Dittner, Wessely et Brown, 2004). Enfin, une étude comparant des victimes de TCC à des sujets sains a pu montrer des différences de fatigue subjective situationnelle entre ces deux groupes en utilisant une seule échelle de type Likert à 5 points (Ashman et al., 2008). Les échelles s'étendent de 0 à 10 (0 étant l'absence de fatigue, d'effort ou de motivation, et 10 représentant un état de fatigue, d'effort ou de motivation maximal) afin de ressembler à l'échelle de perception de l'effort de Borg (Borg, 1982), souvent utilisée dans le domaine sportif, et donc d'en simplifier l'interprétation pour les participants comme pour les chercheurs. L'utilisation d'échelles à 11 points, par rapport à des échelles plus petites, permettrait de diminuer le plus possible l'asymétrie et l'acuité (*kurtosis*) de la distribution des résultats, ce qui la rapprocherait d'une distribution normale et rend plus plausible l'assomption d'équivalence des intervalles des échelles utilisées (Leung, 2011).

Épreuve de raisonnement

Une épreuve de raisonnement était remise au participant (Annexe O). Cette dernière est composée de questions tirées et traduites librement de l'anglais d'un livre de préparation non-officiel au *Law School Admission Test (LSAT Logic Games: Strategy Guide + Online Resources, 2016)*. Le LSAT est un examen d'admission standardisé administré par le *Law*

School Admission Council, dont l'objectif est d'évaluer les capacités en lecture ainsi qu'en raisonnement logique et verbal des étudiants souhaitant rejoindre une école de droit. Le test est très utilisé aux États-Unis, au Canada et en Australie, et il est d'une durée totale de 3h30. Il a été montré que la complétion d'un test semblable mais comprenant notamment davantage de questions mathématiques, le SAT, est associée à une augmentation de la fatigue subjective situationnelle lors d'une version courte de 2h30 (Ackerman et Kanfer, 2009). L'épreuve de raisonnement est basée sur les questions de type « jeux de logique », soit principalement un type de puzzle appelé intégramme. Le principal avantage des intégrammes est qu'ils ne requièrent pas de capacités en calcul élevées pour sa résolution, tout en nécessitant un effort cognitif soutenu. Pour chaque intégramme, une situation et une liste d'éléments à placer en ordre sont donnés, de même qu'une liste de conditions à respecter pour trouver l'ordre originel de tous les éléments du problème. Ce type d'épreuve de raisonnement a déjà été utilisé avec succès pour générer la fatigue cognitive dans une étude dans laquelle les participants devaient compléter des horaires de travail fictifs durant deux heures, tout en respectant différents critères (van der Linden et al., 2003). Dans le cadre de la présente étude, l'épreuve était d'une durée de 60 minutes et avait aussi pour but de fatiguer mentalement le participant. Pour ce faire, le participant devait répondre en ordre aux mises en situations et aux questions, ne pouvant pas sauter les questions jugées difficiles pour répondre aux plus faciles. L'épreuve comprenait un total de 9 mises en situations, avec 3 questions par mise en situation, et était conçue de telle sorte que le participant soit incapable de répondre à toutes les questions dans le laps de temps qui lui était accordé. Le participant recevait comme instruction de répondre au plus de questions possibles, mais de prioriser la qualité des réponses par rapport à la quantité. L'épreuve de raisonnement utilisée a pour but d'émuler un examen scolaire, de sorte que la fatigue générée par l'épreuve ne devrait pas être plus importante que celle déjà retrouvée dans l'environnement scolaire de l'athlète. Tout d'abord, l'épreuve est inspirée d'un test d'admission standardisé et sa durée totale y est plus de trois fois inférieure. De plus, les questions ne font pas appel aux connaissances générales ou aux capacités de calcul des participants et aucun développement n'est demandé, car l'épreuve est à choix multiples.

Tâche informatisée de *task-switching*

Comme mentionné précédemment, la tâche de *task-switching* utilisée avant et après l'épreuve de raisonnement est une épreuve de changement perceptuel et de contrôle réactif (Annexe P). Les participants ne disposaient d'aucun délai entre les stimuli pour préparer leurs réponses et devaient ainsi réagir en fonction de l'indice décisionnel présenté en même temps que chaque stimulus. La tâche Switch de la présente étude a été programmée à l'aide du logiciel Psykinematix (version 1.5.2, KyberVision Japan LLC) sur un ordinateur Mac mini (1,4 GHz, i5, 4GB, Apple Computer Inc., Cupertino, CA, É-U) et présentée sur un écran dans la chambre Faraday (37.4 x 38.1 x 6.2 cm, HP1740, Hewlett-Packard, Palo-Alto, CA, É-U). Le participant demeurait assis tout au long de l'étude, à une distance d'environ 60cm de l'écran. Les données comportementales étaient collectées à l'aide d'un clavier de réponse (modèle RB-540, Cedrus, San Pedro, USA) placé à environ 30cm du participant et enregistrées sous format *.xism*.

La tâche était composée de 2 conditions principales et de 5 blocs de 90 essais présentés de façon pseudo-aléatoire. Les stimuli présentés dans chaque bloc étaient des carrés (70x70mm) ou des cercles (70mm diamètre) de couleur bleu ou vert et équiluminants. Chaque stimulus était présenté jusqu'à ce qu'une réponse soit donnée ou durant un maximum de 2000ms, à un intervalle inter-stimuli constant de 2050ms. La première condition, dite homogène, consistait en 2 blocs d'essais : un bloc avait pour règle d'appuyer sur le bouton gauche du clavier de réponse lorsque le stimulus présenté était bleu et sur le bouton droit lorsqu'il était vert (bloc Couleur). Quant à l'autre bloc, il avait pour règle d'appuyer à gauche lorsque le stimulus était un cercle et à droite lorsqu'il s'agissait d'un carré (bloc Forme). La deuxième condition, dite hétérogène et composée de 3 blocs d'essais, avait pour but de combiner les deux règles de discrimination utilisées dans la première condition au moyen d'un indice décisionnel, dans ce cas-ci le contour de la forme présentée : si le contour du stimulus était une ligne pleine, le participant devait répondre en fonction de la première règle de discrimination, alors que si le contour était une ligne pointillée, il devait répondre en fonction de la seconde règle de discrimination. Dans la présente étude, deux versions de la tâche étaient utilisées. Dans la version A, le participant devait répondre aux différents blocs selon l'ordre suivant : bloc Couleur; bloc Forme; bloc Hétérogène 1; bloc Hétérogène 2; bloc Hétérogène 3. Pour tous les blocs, le participant

recevait comme consigne de répondre le plus rapidement possible tout en faisant le moins d'erreurs possible. Avant chacun des blocs, des instructions étaient affichées à l'écran et communiquées oralement par le chercheur, puis le participant devait compléter un bloc de 30 essais afin de se pratiquer. Avant la série de 3 blocs hétérogènes, en raison de la complexité de la tâche, le participant devait compléter un bloc de pratique sans contrainte de temps, puis un bloc de pratique avec l'intervalle inter-stimuli de 2050ms. Si sa précision était inférieure à 70% dans le bloc de pratique, le participant devait compléter à nouveau le bloc de pratique, mais ne pouvait le compléter qu'un maximum de 2 reprises. Dans la condition hétérogène, le participant doit répondre en fonction de la couleur du stimulus si son contour est une ligne pleine et en fonction de la forme du stimulus si son contour est une ligne pointillée. Dans la version B, c'est le contraire qui s'applique : le participant devait répondre en fonction de la forme si le contour était une ligne pleine et en fonction de la couleur s'il s'agissait d'une ligne pointillée. Pour cette raison, l'ordre de présentation des blocs changeait également : bloc Forme; bloc Couleur; bloc Hétérogène 1; bloc Hétérogène 2; bloc Hétérogène 3. Dans les deux versions, le contour des stimuli présentés dans chaque bloc de la condition homogène était déterminé par la règle décisionnelle de la condition hétérogène : dans la version A, le contour des stimuli était une ligne pleine pour le bloc Couleur et une ligne pointillée pour le bloc Forme. Pour le bloc B, le contour était une ligne pleine pour le bloc Forme et une ligne pointillée pour le bloc Couleur. Chaque participant devait d'abord répondre à une version de la tâche au début de l'expérimentation, puis à l'autre après avoir complété l'épreuve de raisonnement. L'ordre de passation des versions était contrebalancé.

Traitement des données

Données comportementales

Concernant la tâche de *task-switching*, les essais résultant en une réponse incorrecte et les essais dont le temps de réponse était inférieur à 200ms étaient calculés comme des erreurs de commission. Les essais dépassant la durée de présentation des stimuli tout en demeurant sans réponse étaient calculés comme des erreurs d'omission. Les scores de précision ont été calculés en divisant le nombre de réponses correctes au nombre d'essai total. Afin de refléter le temps nécessaire aux participants pour obtenir une réponse correcte, les

moyennes et les écart-types des temps de réponse de chaque participant n'ont été calculés qu'à partir des essais dont la réponse était correcte. En général dans la littérature, les temps de réponse sont analysés à partir de la moyenne de l'ensemble des temps de réponse, mais la distribution de ces derniers est connue pour correspondre davantage à une courbe ex-gaussienne qu'à une courbe gaussienne, ce qui peut résulter en une perte de puissance statistique au moment de réaliser une ANOVA (Whelan, 2008). Pour y remédier, les paramètres de la fonction ex-gaussienne de chaque distribution ont été estimés à partir de MATLAB (R2020a, The MathWorks Inc., Natick, MA) à l'aide de la boîte d'outils Distrib (Lacouture et Cousineau, 2008). Les trois paramètres générés sont μ , σ et τ . Ces trois paramètres représentent, respectivement, la moyenne et l'écart-type de la fonction gaussienne et le paramètre de décroissance exponentielle. Les distributions des essais switch, des essais non-switch, des essais congruents et des essais incongruents ont été obtenues. Les essais switch sont les essais associés à un changement de règle pour le participant. Les essais non-switch signifient que le participant doit répondre à la même règle qu'à l'essai précédent. Les essais incongruents sont ceux dont les caractéristiques du stimulus sont associées à une interférence de réponses : par exemple, un cercle vert indique une réponse à gauche en fonction de la règle de discrimination de la forme, mais une réponse à droite en fonction de la règle de discrimination de la couleur. Les essais congruents sont ceux dont les caractéristiques du stimulus indiquent la même réponse, peu importe la règle de discrimination qui doit être appliquée.

Données EEG

Les données EEG ont été collectées à partir d'un filet Geodesic EEG Sensor Net (EGI, Eugene, OR, É-U) de 128 électrodes. En conformité avec les exigences pour le system Net Station, l'impédance des électrodes était conservée en-dessous de 50 k Ω . L'électrode de référence était Cz. Le signal était amplifié à l'aide d'un amplificateur Net Amps 200 (EGI, Eugene, OR, É-U). Un filtre avec une bande-passante de 0,1 à 100Hz était appliqué en temps réel. La fréquence d'échantillonnage était de 250Hz et les données enregistrées sur le logiciel Net Station (EGI, Eugene, OR, É-U). À l'aide de la boîte d'outils EEGLAB (Delorme et Makeig, 2004) sur MATLAB, les données ont ensuite été re-référencées sur les deux électrodes mastoïdes, puis filtrées à nouveau avec une bande-passante de 0.1 à

30Hz (-6dB (0.05 – 30.05)). Les canaux montrant une activité anormale ont été supprimés via inspection visuelle et en utilisant l’outil d’observation de l’activité spectrale captée par chacun des canaux. Ensuite, chaque enregistrement a été soumis à une inspection visuelle visant à retirer les artefacts évidents, soient des perturbations brusques du signal capté sur une majorité d’électrodes à un même moment. Une analyse en composantes indépendantes fut aussi effectuée sur chaque enregistrement et les composantes obtenues soumises à une inspection visuelle afin d’en retirer les artefacts oculaires. Finalement, une transformation rapide de Fourier a été effectuée sur chacun des jeux de données, qui ont été divisés en segments de 1 seconde avec une fenêtre de Hanning de 50%.

Données d’électrocardiographie (ECG)

Les données obtenues à partir du cardiofréquencemètre, à une fréquence d’enregistrement de 250Hz, ont été segmentées à l’aide du logiciel Kubios HRV Premium 3.3.0 (Tarvainen, Niskanen, Lipponen, Ranta-Aho et Karjalainen, 2014). À partir des données ECG, l’algorithme du logiciel permet d’identifier les pics R de chaque battement cardiaque et de calculer les intervalles RR nécessaires au calcul de la VFC. En tout, 12 segments ont été définis : 1 segment Repos (durée de 5 minutes), 10 segments associés aux blocs de la tâche Switch (tous d’une durée de plus de 3 minutes) et 1 segment associé à l’épreuve de raisonnement (d’une durée de 60 minutes). Les segments ont tous été inspectés visuellement pour s’assurer que le logiciel ait correctement identifié les points R. La correction automatique d’artefacts offerte par défaut avec le logiciel a été appliquée afin d’avoir une détection optimale de battements manquants et de battements ectopiques (Lipponen et Tarvainen, 2019). Un cardiofréquencemètre mal installé ne nous a pas permis de collecter les données ECG de l’un des participants. De plus, suite à la correction automatique effectuée par le logiciel, un participant a été retiré des analyses subséquentes puisqu’il montrait un pourcentage d’artefacts supérieur à 5% dans 3 segments sur un total de 12.

Exclusion des données

Deux participants du groupe HC ne rapportaient aucun diagnostic de TDA, mais ont néanmoins obtenu un score significativement élevé à l’échelle d’inattention du DSM du CAARS (scores T > 65), et l’un d’entre eux a obtenu un score significatif à l’échelle de

TDAH DSM du CAARS (score T de 68). Étant donné que rien ne permet de savoir si les problèmes d'attention rapportés sont prémorbides ou bien une conséquence des commotions, il a été décidé de ne pas rejeter ces participants sur la base de ce critère. Au BDI-II, un seul participant a obtenu un score supérieur au seuil clinique. Un entretien avec le participant a permis de déterminer que la cause de ce score élevé était contextuelle. Cependant, le participant revenait tout juste d'un long voyage en Europe : comme le construit à l'étude est la fatigue cognitive et qu'il peut être affecté par l'état d'esprit d'une personne et le décalage horaire, il a été décidé de retirer ce participant des analyses. Les participants ayant obtenu des scores au-delà des normes de ces questionnaires ont été informés de ces découvertes fortuites et une liste de ressources leur a été proposée au cas où ils souhaitaient obtenir un suivi professionnel. Deux autres participants ont été retirés parce qu'ils présentaient des scores extrêmes dans la condition hétérogène au niveau de la précision (scores Z de -2,84 et -2,22 en pré et de -2,80 et -2,50 en post). Cette différence par rapport à l'ensemble des autres participants était également marquée pour les essais *switch* (scores Z de -2.89 et -2.30 en pré et de -3.06 et -2.09 en post), ce qui suggère une différence dans la compréhension de la tâche ou dans la stratégie de réponse chez ces deux participants par rapport à l'ensemble des participants. Enfin, un participant a rapporté avoir un souffle cardiaque. Puisqu'il s'agit d'une condition qui ne l'empêche pas de pratiquer son sport, mais qui peut biaiser les résultats obtenus avec l'électrocardiogramme, seulement ses données portant sur la variabilité de la fréquence cardiaque ont été exclues des analyses.

Analyses

Données démographiques

Les moyennes d'âge, d'indice de masse corporelle, d'années de pratique du sport et d'années de scolarité de chacun des groupes sont comparées au moyen de tests-t bilatéraux pour échantillons indépendants.

Données relatives aux questionnaires

Les moyennes des scores totaux des différents questionnaires (BAI, BDI-II, ISI, ESS, PSQI et le questionnaire sur la douleur de McGill) ainsi que des scores T de la sous-échelle d'inattention du CAARS sont comparées via des tests-t unilatéraux pour échantillons indépendants. Partant de la prémisse selon laquelle les participants ayant un historique de commotions cérébrales appartiennent à une population hétérogène en raison des différences inter-individuelles de rétablissement, l'hypothèse d'égalité des variances est également testée pour chaque comparaison avec le test de Levene. Advenant une inégalité des variances, les résultats du test T de Welch sont rapportés.

Pour explorer la relation entre les scores de fatigue générale obtenus par les questionnaires FSS et IMF-20, mais aussi entre les scores de fatigue générale et mentale, la performance à la tâche Switch et les scores aux différents questionnaires, les covariances sont analysées par le biais d'analyses corrélationnelles du produit des moments de Pearson.

Pour tenir compte de la non-normalité des scores de l'échelle de Likert, les niveaux subjectifs de fatigue, d'effort cognitif et de motivation des participants avant de commencer l'expérimentation sont comparés via le test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants. Le même test est utilisé afin de déterminer si les scores des groupes différaient après les 5 minutes de repos, après la complétion de la première tâche Switch et après l'épreuve de raisonnement censée les fatiguer. Ensuite, pour analyser l'évolution de la fatigue, de l'effort et de la motivation à travers l'expérimentation pour l'ensemble des participants (post-repos, post-switch et post-épreuve), 3 ANOVAs de Friedmann sont effectuées. En cas de significativité, des tests post-hocs de Wilcoxon sont effectués pour

déterminer d'où provient la différence, avec une correction de Bonferroni appliquée pour les comparaisons multiples, à un niveau de signification de .0167.

Données comportementales

Les nombres de bonnes réponses et de réponses complétées des deux groupes seront comparés via deux tests-t pour échantillons indépendants.

Pour tester l'effet de la fatigabilité de performance de la première tâche Switch à la seconde, les analyses des données comportementales sont faites dans un premier temps à partir des scores de précision et des temps de réponse des conditions homogène et hétérogène, puis des 3 coûts de commutation (*switch costs*), pour la précision et pour les temps de réponse, calculés d'après les équations suivantes:

$$\text{Coût global (Précision)} = (\text{essais homogènes}) - (\text{essais hétérogènes})$$

$$\text{Coût global (Temps de réaction)} = (\text{essais hétérogènes}) - (\text{essais homogènes})$$

$$\text{Coût local (Précision)} = \text{Hétérogène (essais Non-Switch)} - \text{Hétérogène (essais Switch)}$$

$$\text{Coût local (Temps de réaction)} = \text{Hétérogène (essais Switch)} - \text{Hétérogène (essais Non-Switch)}$$

$$\text{Coût Congruence (Précision)} = (\text{essais congruents}) - (\text{essais incongruents})$$

$$\text{Coût Congruence (Temps de réaction)} = (\text{essais incongruents}) - (\text{essais congruents})$$

Les variables dépendantes sont analysées avec des ANOVAs mixtes à deux facteurs (GROUPE x TEMPS). Afin d'avoir une description plus détaillée des données, les temps de réaction et les coûts qui y sont associés sont calculés avec les paramètres μ , σ et τ de la courbe ex-gaussienne estimée à partir de la distribution des temps de réponse de chaque participant.

Chacun des groupes sera examiné individuellement. Le lien entre la fatigue quotidienne de chaque groupe et les symptômes de dépression du BDI-II sera analysé par le biais

d'analyses corrélationnelles du produit des moments de Pearson. Le lien entre la fatigue quotidienne et les indices de performance sera aussi examiné par le biais d'analyses corrélationnelles du produit des moments de Pearson, les variables examinées étant l'ensemble des indices comportementaux de performance et les scores à la FSS, à la sous-échelle de fatigue général et à la sous-échelle de fatigue mentale de l'IMF-20. Si une variable de performance corrèle significativement avec les scores de fatigue quotidienne, la relation entre cette variable et les scores de somnolence, les symptômes d'anxiété et de dépression et les troubles du sommeil sera également examinée.

Analyse des données EEG

Les données d'électroencéphalographie ont été analysées via EEGLAB à l'aide de l'extension STUDY. Étant donné que les hypothèses de l'étude étaient déjà bien définies quant aux régions qui seraient sujettes à des changements de puissance spectrale ($10 \cdot \log_{10}(\mu V^2/Hz)$), un total de 4 groupements d'électrodes ont été formés, chacun correspondant à une région précise du scalp : la région frontale ('E11', 'E16', 'E10', 'E18', 'E19', 'E12', 'E5', 'E4'), la région centrale ('Cz', 'E106', 'E7', 'E31', 'E55', 'E80'), la région pariétale ('E62', 'E61', 'E67', 'E77', 'E72', 'E78') et la région occipitale centrale ('E70', 'E71', 'E74', 'E75', 'E76', 'E82', 'E83'). La puissance spectrale des bandes thêta, alpha-1 et alpha-2 a été obtenue en calculant la moyenne de la puissance spectrale de chaque groupement d'électrodes. Une ANOVA simple a d'abord été effectuée pour comparer la puissance spectrale de la bande alpha des deux groupes au niveau de la région occipitale lors des 5 minutes de repos, avant de débiter la tâche. Étant donné que les hypothèses formulées plus haut sur les régions du scalp qui seront sujettes à des changements d'activité spectrale sont déjà sujettes à une forte réplicabilité dans la littérature, des ANOVA mixtes à deux facteurs (TEMPS x GROUPE) ont été effectuées afin de comparer l'activité mesurée sur les régions frontale et centrale pour la bande thêta (4- 7Hz), et centrale et pariétale pour la puissance de les bandes alpha-1 (8-10Hz) et alpha-2 (11-13Hz) comme variables dépendantes. Les variables indépendantes sujettes à comparaisons sont les suivantes :

Condition Homogène Pré vs. Condition Homogène Post

Condition Hétérogène Pré vs Condition Hétérogène Post

Analyse de la VFC

Les interactions entre les systèmes nerveux sympathique et parasympathique sont complexes, linéaires ou non-linéaires et fréquemment non-réciproques, et lorsqu'un individu est à l'état de repos et en position assise, les contributeurs majoritaires de la puissance spectrale des basses fréquences, couramment associées à l'activité sympathique, sont en fait l'activité parasympathique et les réflexes des barorécepteurs (Shaffer et Ginsberg, 2017). Les mêmes auteurs précisent que les deux systèmes ne peuvent être considérés comme des antagonistes, puisqu'une augmentation de l'activité parasympathique peut être associée à une diminution, à une augmentation ou à aucun changement au niveau du système nerveux sympathique. Pour cette raison, étudier l'équilibre entre les systèmes nerveux autonomes avec des ratios ou des mesures de puissance relative (HF%) plutôt que des paramètres plus indépendants peut mener à des erreurs d'analyse : par exemple, le ratio LF/HF peut rester identique au cours d'une expérimentation, alors qu'en fait la puissance spectrale de chacune des bandes augmente de façon proportionnelle. Pour ces raisons, seulement une variable d'analyse spectrale, soit la puissance relative des hautes fréquences, est utilisée dans les analyses, car cette dernière a déjà été associée à la performance à des tâches recrutant les fonctions exécutives. Pour analyser la VFC et ses changements à travers l'expérimentation, il a été décidé d'utiliser des paramètres non-linéaires, c'est-à-dire les paramètres tirés du graphique de dispersion de Poincaré, une méthode consistant à placer la valeur de chaque intervalle inter-battements(R-R) N en fonction de l'intervalle N-1. Une ellipse est formée autour des points en fonction de leur dispersion, à partir de deux paramètres principaux, soient SD1, correspondant à la VFC à court terme et à l'écart-type des valeurs se situant autour de la ligne d'identité, et SD2, correspondant à la VFC à court et à long terme et à l'écart-type des valeurs le long de la ligne d'identité. Pour éviter toute redondance dans les analyses, la moyenne quadratique des déviations successive (RMSSD; *root mean square of successive deviations*) n'est pas directement utilisée en tant que paramètre, mais il a été démontré mathématiquement que SD1 et RMSSD sont des mesures identiques (Ciccone et al., 2017). Le ratio SD2/SD1 est une mesure de la prédictibilité des intervalles R-R, un ratio bas signifiant une prédictibilité plus faible.

Une ANOVA simple à un facteur est utilisée pour comparer la puissance relative des hautes fréquences entre les groupes, puis les variables dépendantes mentionnées plus haut sont analysées par le biais d'ANOVAs mixtes à deux facteurs (GROUPE x TEMPS) pour comparer les valeurs lors de la condition homogène de la première tâche Switch (pré-fatigue) et de la seconde tâche Switch (post-fatigue) :

Condition Homogène Pré vs. Condition Homogène Post

Condition Hétérogène Pré vs. Condition Hétérogène Post

Pour explorer l'hypothèse selon laquelle la puissance relative des hautes fréquences serait liée à la performance lors de tâches recrutant les fonctions exécutives, la covariance de chaque variable de précision et de temps de réponse lors de la condition hétérogène et de la variable HF% est analysée par le biais d'analyses corrélationnelles du produit des moments de Pearson.

Résultats

Données démographiques

Les moyennes d'âge, d'années de pratique du sport et d'années de scolarité de chacun des groupes sont similaires (voir Tableau 1). Seul l'indice de masse corporel est significativement plus élevé pour les sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = 27.10$, $\text{É-T} = 5.00$) par rapport aux sujets témoins ($M = 23.35$, $\text{É-T} = 2.14$), $t(22) = -2.393$, $p = .026$.

Comme la proportion de femmes dans le groupe de sujets avec un historique de commotion cérébrale est plus élevée (33.33%) que pour le groupe de sujets témoins (8.33%) et que les femmes rapportent généralement davantage de symptômes post-commotionnels que les hommes (Covassin, Savage, Bretzin et Fox, 2018), ce qui comprend les symptômes de fatigue (Sinnott, Kontos, Collins et Ortega, 2020), les moyennes des scores aux questionnaires auto-rapportés des femmes du groupe avec commotion cérébrale ont été comparées à celles des hommes du même groupe afin de déterminer si cette proportion plus grande n'affecterait pas les résultats. Des tests-t unilatéraux pour échantillons indépendants ont été effectués pour chaque questionnaire auto-rapporté. L'hypothèse d'égalité des variances a également été testée pour chaque comparaison avec le test de Levene et advenant une inégalité des variances, les résultats du test T de Welch sont rapportés. Aucune différence significative n'a été trouvée entre les moyennes des femmes et celles des hommes aux questionnaires ($ps > .05$).

		Groupe	
		ST (N = 12)	HC (N = 12)
Sexe	Femme	1	4
	Homme	11	8
Latéralité	Gaucher	2	1
	Droitier	10	11
Âge		23.24 _a (2.83)	23.01 _a (2.55)
IMC (kg/m ²)		23.35 _a (2.14)	27.10 _b (5.00)
Années Pratique Sport		5.42 _a (4.87)	7.38 _a (5.33)
Années Scolarité		16.33 _a (2.64)	16.04 _a (2.07)
Nb. Commotions		.00 _a	2.83 _b (1.27)
Mois depuis la dernière commotion		. ¹	11.00 ¹ (7.56)
Nb. Symptômes		. ¹	13.17 ¹ (6.59)
Durée des symptômes (jours)		. ¹	19.79 ¹ (24.83)
Gravité des symptômes		. ¹	35.67 ¹ (24.08)

TABLEAU 1

Données démographiques de l'échantillon final, où le groupe ST désigne les sujets témoins et le groupe HC les sujets avec un historique de commotion cérébrale. L'IMC désigne l'indice de masse corporelle et le nombre de symptômes, leur durée et la gravité sont ceux de la dernière commotion cérébrale rapportée et ont été mesurés à l'aide de la liste de symptômes qui se retrouve dans le SCAT-3 (Guskiewicz et al., 2013). Remarque : les valeurs dans la même ligne et sous-table ne partageant pas le même indice diffèrent significativement à $p < .05$ dans le test bilatéral d'égalité pour moyennes de colonne. Les cellules sans indice ne sont pas incluses dans le test. Les tests supposent des variances égales.

1. Cette catégorie n'est pas utilisée pour les comparaisons car il n'y a pas d'autres catégories valides à comparer.

Données relatives aux questionnaires

Les sujets ayant un historique de commotion cérébrale ont rapporté avoir une qualité de sommeil plus faible au PSQI ($M = 5.75$, $\acute{E}-T = 2.80$) que les sujets témoins ($M = 3.58$, $\acute{E}-T = 2.11$). Cette différence était significative $t(22) = -2.14$, $p = .022$, ce qui représente une taille d'effet ($r = .42$) moyenne à élevée.

La variance des symptômes d'anxiété rapportés au BAI des sujets avec un historique de commotion cérébrale ($\acute{E}-T = 5.40$) est significativement plus grande que celle des sujets témoins ($\acute{E}-T = 2.47$), $F(22) = 6.1$, $p = .022$, telle que mesurée avec le test de Levene. En utilisant le test T de Welch pour contrôler pour la différence de variance, les symptômes d'anxiété des sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = 6.25$, $\acute{E}-T = 5.40$) demeurent significativement plus élevés que ceux des sujets témoins ($M = 2.92$, $\acute{E}-T = 2.47$), $t(22) = -1.95$, $p = .035$, ce qui représente une taille d'effet ($r = .38$) moyenne à élevée.

Aucune différence significative n'a été trouvée sur les scores des autres questionnaires (voir Tableau 2).

Statistiques de groupe

Groupe		N	Moyenne	Écart-type
CAARS (Inattention)	ST	12	41.75	6.08
	HC	12	42.83	7.90
BAI (Total)*	ST	12	2.92	2.47
	HC	12	6.25	5.40
BDI-II (Total)	ST	12	3.67	2.53
	HC	12	4.17	3.54
ISI (Total)	ST	12	5.42	5.57
	HC	12	6.42	4.29
ESS (Total)	ST	12	5.67	3.65
	HC	12	7.17	2.79
FSS (Total)	ST	12	22.50	7.59
	HC	12	19.83	7.57
PSQI (Total)*	ST	12	3.58	2.11
	HC	12	5.75	2.80
IMF (Fatigue générale)	ST	12	9.00	2.92
	HC	12	9.75	3.39
MPQ (Total)	ST	12	4.17	3.88
	HC	12	5.50	6.10

TABLEAU 2

Moyennes et écart-types des scores aux questionnaires utilisés des sujets témoins (ST) et des sujets avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les astérisques indiquent une différence significative entre les moyennes des deux groupes ($p < .05$).

Pour l'ensemble des participants ($n = 24$), les scores au questionnaire FSS ($r = .503$, $p = .012$, $r^2 = .25$) et à la sous-échelle de fatigue générale du questionnaire IMF-20 ($r = .408$, $p = .048$, $r^2 = .17$) corrélaient significativement avec le paramètre μ des temps de réponses à la condition hétérogène de la première tâche Switch. À titre informatif, les scores de ces deux échelles corrélaient positivement et significativement, $r = .78$, $p = .000$, $r^2 = .61$ (voir Tableau 3).

Pour l'ensemble des participants ($n = 24$), les scores au questionnaire FSS corrélaient significativement avec les scores au BDI-II ($r = .41$, $p = .046$, $r^2 = .17$), au ISI ($r = .43$, $p = .038$, $r^2 = .18$) et au ESS ($r = .42$, $p = .040$, $r^2 = .18$). Les scores à la sous-échelle de fatigue générale de l'IMF-20 corrélaient positivement et significativement avec les scores au PSQI ($r = .49$, $p = .015$, $r^2 = .24$), au BDI-II ($r = .59$, $p = .002$, $r^2 = .35$), de l'ISI ($r = .65$, $p = .001$, $r^2 = .42$) et de l'ESS ($r = .62$, $p = .001$, $r^2 = .39$). Les scores au BAI ne corrélaient significativement avec aucune de ces échelles de fatigue ($ps < .05$). La matrice de corrélations du Tableau 3 présente plus clairement la relation entre chacun de ces outils.

Corrélations

		FSS	IMF	BAI	BDI-II	ISI	ESS	PSQI
FSS	Corrélation de Pearson		,776**	0,080	,411*	,425*	,422*	0,310
	Sig. (bilatérale)		0,000	0,710	0,046	0,038	0,040	0,140
	N		24	24	24	24	24	24
IMF	Corrélation de Pearson	,776**		0,401	,594**	,647**	,624**	,492*
	Sig. (bilatérale)	0,000		0,052	0,002	0,001	0,001	0,015
	N	24		24	24	24	24	24
BAI	Corrélation de Pearson	0,080	0,401		,743**	,553**	0,153	,568**
	Sig. (bilatérale)	0,710	0,052		0,000	0,005	0,475	0,004
	N	24	24		24	24	24	24
BDI-II	Corrélation de Pearson	,411*	,594**	,743**		,721**	0,347	,601**
	Sig. (bilatérale)	0,046	0,002	0,000		0,000	0,097	0,002
	N	24	24	24		24	24	24
ISI	Corrélation de Pearson	,425*	,647**	,553**	,721**		,633**	,648**
	Sig. (bilatérale)	0,038	0,001	0,005	0,000		0,001	0,001
	N	24	24	24	24		24	24
ESS	Corrélation de Pearson	,422*	,624**	0,153	0,347	,633**		0,261
	Sig. (bilatérale)	0,040	0,001	0,475	0,097	0,001		0,218
	N	24	24	24	24	24		24
PSQI	Corrélation de Pearson	0,310	,492*	,568**	,601**	,648**	0,261	
	Sig. (bilatérale)	0,140	0,015	0,004	0,002	0,001	0,218	
	N	24	24	24	24	24	24	

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

TABLEAU 3

Matrice des corrélations entre les scores des différents questionnaires. Par souci de concision, seuls les scores des outils concernés par l'hypothèse 6 (« La fatigue subjective et la performance corrèleront avec la somnolence, les symptômes anxiété, les symptômes de dépression ainsi que les troubles du sommeil ») sont intégrés dans cette matrice.

Alors que les scores du BDI-II ne corrèlent avec aucune des échelles générales de fatigue quotidienne pour les sujets témoins, une corrélation significative a été obtenue entre les scores des sujets avec un historique de commotion cérébrale et les scores à la sous-échelle de fatigue générale de l'IMF-20($r = .65$, $p = .023$, $r^2 = .42$). Afin d'explorer la possibilité d'un chevauchement des construits que sont la fatigue et la dépression, le BDI-II a été divisé en deux facteurs (Cognitif et Sommatif-Affectif). Seul le facteur Sommatif-Affectif corrélait avec les scores de fatigue générale ($r = .76$, $p = .004$, $r^2 = .58$).

Données relatives aux échelles de Likert

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les groupes aux échelles de Likert avant de commencer l'expérimentation, avant la première tâche Switch, après la première tâche Switch et après l'épreuve de raisonnement ($p > .05$).

Les niveaux de fatigue ont augmenté significativement au cours de l'expérimentation ($\chi^2(2) = 13.517$, $p = .001$). Les tests post-hocs montrent que le niveau de fatigue après la première complétion de la tâche Switch est significativement plus élevé ($M = 4.42$, $\bar{E} - T = 1.97$) qu'avant de la compléter ($M = 3.29$, $\bar{E} - T = 1.78$) $T = 40$, $p = .007$, $r = -.55$. Le niveau de fatigue ne diffère pas après la complétion de la première tâche Switch et après l'épreuve de raisonnement ($p > .0167$), mais est significativement plus élevé après l'épreuve de raisonnement ($M = 4.65$, $\bar{E} - T = 2.31$) qu'avant la tâche Switch ($M = 3.29$, $\bar{E} - T = 1.78$), $T = 54.50$, $p = .01$, $r = -.52$.

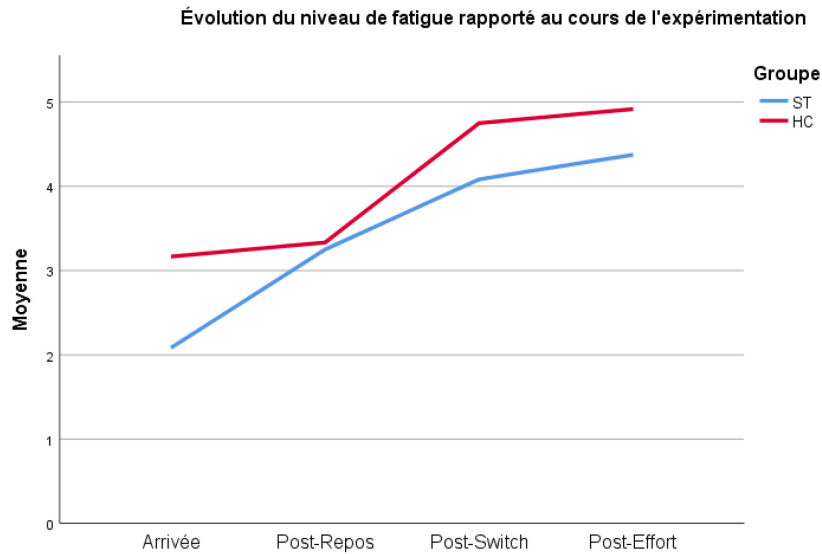


FIGURE 1

Évolution du niveau de fatigue cognitive rapporté avant de commencer l'expérimentation (Arrivé), après la période de repos (Post-Repos), après avoir complété la première tâche Switch (Post-Switch) et après avoir complété l'épreuve de raisonnement (Post-Effort). Aucune différence n'a été trouvée entre les sujets témoins (ST) et ceux avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les sujets ont connu une augmentation générale significative de leur niveau de fatigue rapporté du temps 2 (Post-Repos) au temps 3 (Post-Switch).

Les niveaux d'effort cognitif ont augmenté significativement au cours de l'expérimentation ($\chi^2(2) = 31.032, p = .000$). Les tests post-hocs montrent que le niveau d'effort après la première complétion de la tâche Switch est significativement plus élevé ($M = 4.42, \acute{E}-T = 2.06$) qu'avant de la compléter ($M = 1.33, \acute{E}-T = 1.81$) $T = 0, p = .000, r = -.82$. Le niveau d'effort est également significativement plus élevé après l'épreuve de raisonnement ($M = 6.08, \acute{E}-T = 2.21$) qu'après la tâche Switch ($M = 4.42, \acute{E}-T = 2.06$), $T = 53.50, p = .005, r = -.57$. Il va de soi que la différence entre les niveaux d'effort après l'épreuve de raisonnement et au début de l'expérimentation est également significative, $T = 11, p = .000, r = -.81$.

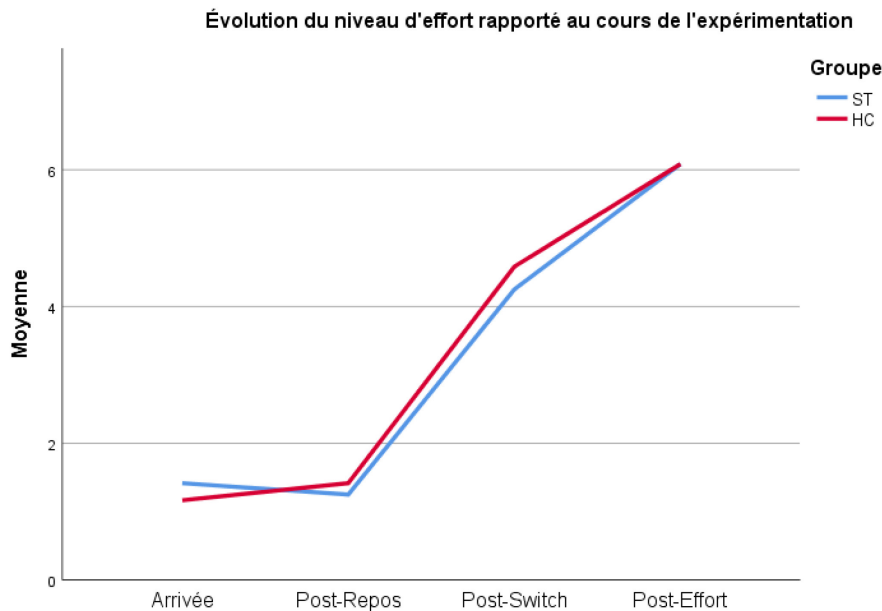


FIGURE 2

Évolution du niveau d'effort cognitif rapporté avant de commencer l'expérimentation (Arrivé), après la période de repos (Post-Repos), après avoir complété la première tâche Switch (Post-Switch) et après avoir complété l'épreuve de raisonnement (Post-Effort). Aucune différence n'a été trouvée entre les sujets témoins (ST) et ceux avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les sujets ont connu une augmentation générale significative d'effort rapporté du temps 2 (Post-Repos) au temps 4 (Post-Effort).

Les niveaux de motivation ont diminué significativement au cours de l'expérimentation ($\chi^2(2) = 11.594, p = .003$). Les tests post-hocs montrent que le niveau de motivation après la première complétion de la tâche Switch est significativement plus bas ($M = 6.79, \acute{E}-T = 1.44$) qu'avant de la compléter ($M = 7.25, \acute{E}-T = 1.15$) $T = 21, p = .0165, r = -.49$. Le niveau de motivation ne diffère pas après la tâche Switch et après l'épreuve de raisonnement ($p > .0167$). La différence entre les niveaux de motivation après l'épreuve de raisonnement et au début de l'expérimentation est significative, $T = 25, p = .013, r = -.50$.

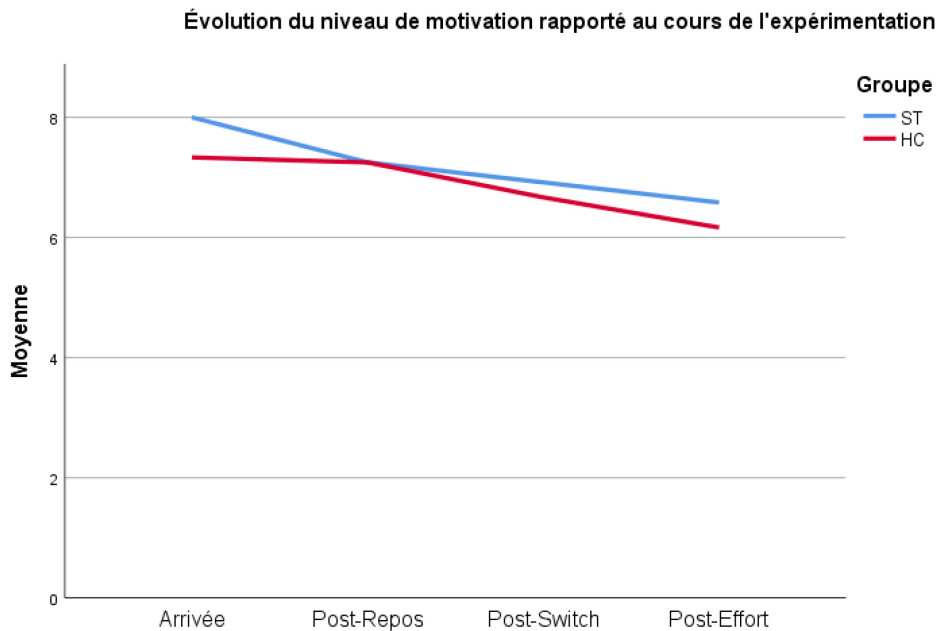


FIGURE 3

Évolution du niveau de motivation rapporté avant de commencer l'expérimentation (Arrivé), après la période de repos (Post-Repos), après avoir complété la première tâche Switch (Post-Switch) et après avoir complété l'épreuve de raisonnement (Post-Effort). Aucune différence n'a été trouvée entre les sujets témoins (ST) et ceux avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les sujets ont connu une diminution générale significative de leur niveau de motivation rapporté du temps 2 (Post-Repos) au temps 3 (Post-Switch).

Performance à l'épreuve de raisonnement

Aucune différence significative à l'épreuve de raisonnement n'a été trouvée entre le nombre moyen de bonnes réponses et de réponses complétées au total des sujets témoins ($M = 6.33$, $\acute{E}-T = 3.6$; $M = 12.33$, $\acute{E}-T = 6.17$) et des sujets avec un historique de commotion ($M = 5.25$, $\acute{E}-T = 2.22$; $M = 12.92$, $\acute{E}-T = 4.58$).

Performance à la tâche Switch

Changements dans les scores de précision pour les conditions Homogène et Hétérogène

Pour la variable dépendante HOMOGENE PRÉCISION, une interaction significative entre les variables GROUPE et TEMPS a été trouvée $F(1, 22) = 5.569$, $p = .028$, $r = .45$ (voir Figure 4). Les sujets témoins montrent une augmentation de leur précision de la première complétion de la tâche homogène ($M = 97.78$, $\acute{E}-T = 1.74$) et la seconde ($M = 98.33$, $\acute{E}-T = 1.34$), alors que les sujets avec un historique de commotion montrent une diminution de leur précision du temps 1 ($M = 98.47$, $\acute{E}-T = 2.27$) au temps 2 ($M = 98$, $\acute{E}-T = 1.83$). Cependant, les tests post-hocs effectués se révèlent non-significatifs ($p > .05$).

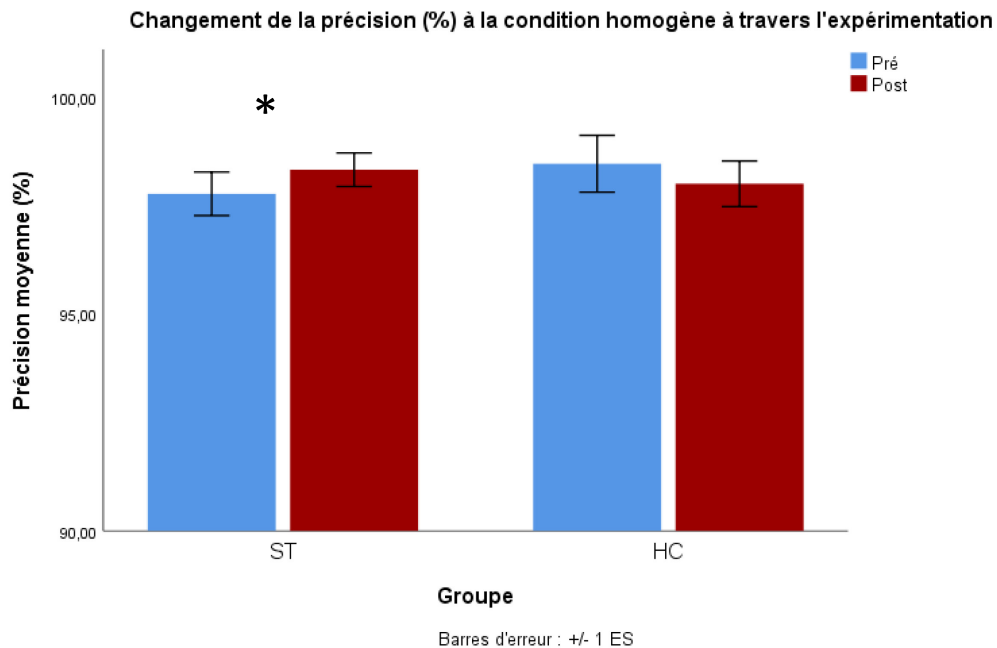


FIGURE 4

Changement de la précision moyenne à la condition homogène de la première tâche Switch (en bleu) à la seconde (en rouge), chez les sujets témoins (ST) et les sujets avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les sujets témoins présentent une augmentation significative de la précision, $F(1, 22) = 5.569$, $p = .028$, $r = .45$.

Pour la variable dépendante HÉTÉROGÈNE PRÉCISION, une interaction significative entre les variables GROUPE et TEMPS a été trouvée $F(1, 22) = 5,212$, $p = .032$, $r = .44$ (voir Figure 5). Cette interaction serait due à une diminution de la précision à la condition hétérogène pour les sujets témoins, de la première tâche Switch ($M = 94.48\%$, $\acute{E}-T = 3.79$) à la seconde ($M = 91.11\%$, $\acute{E}-T = 4.42$), $F(1, 22) = 10.324$, $p = .008$, $r = .57$. Les sujets avec un historique de commotion cérébrale, quant à eux, n'ont connu aucun changement dans la précision à la tâche ($p > .05$), tout en ayant une précision équivalente à celle des sujets témoins lors de la première tâche Switch ($p > .05$).

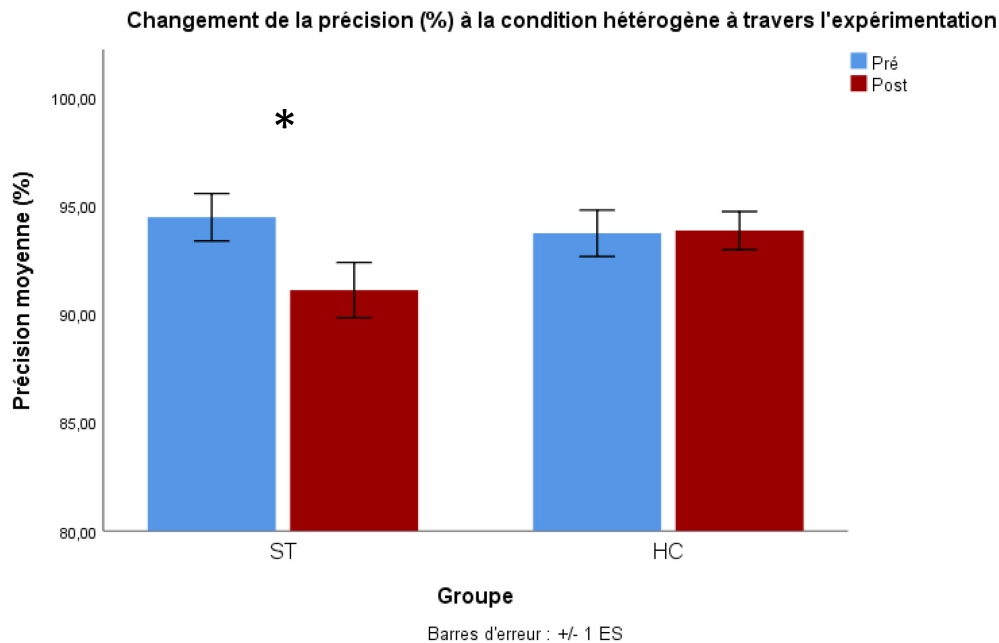


FIGURE 5

Changement de la précision moyenne à la condition hétérogène de la première tâche Switch (en bleu) à la seconde (en rouge), chez les sujets témoins (ST) et les sujets avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les sujets témoins présentent une diminution significative de la précision, $F(1, 22) = 5,212$, $p = .032$, $r = .44$.

Changements dans les temps de réponse pour les conditions Homogène et Hétérogène

Condition Homogène

Pour la variable dépendante HOMOGÈNE MU, aucune interaction significative entre les variables GROUPE et TEMPS n'a été trouvée. Cependant, un effet principal de la variable GROUPE a été trouvé, les sujets commotionnés ayant généralement des valeurs μ plus élevées ($M = 342.24$, $\acute{E}-T = 34.66$) que les sujets témoins ($M = 318,67$, $\acute{E}-T = 23.40$), $F(1, 22) = 4.789$, $p = .040$, $r = .42$ (voir Figure 6).

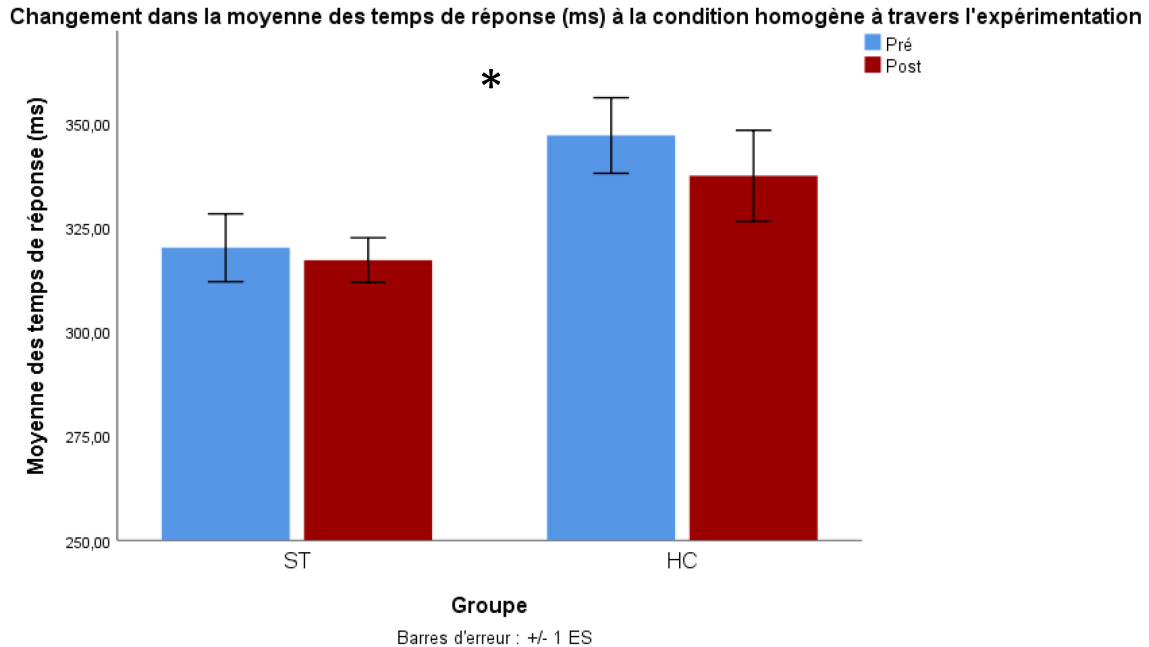


FIGURE 6

Changement de la moyenne des temps de réponse à la condition homogène de la première tâche Switch (en bleu) à la seconde (en rouge), chez les sujets témoins (ST) et les sujets avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les sujets avec un historique de commotion cérébrale présentent en général des temps de réponse plus élevés, $F(1, 22) = 4.789$, $p = .040$, $r = .42$).

Pour la variable dépendante HOMOGENE SIGMA, aucune interaction et aucun effet principal n'ont été trouvés ($ps > .05$).

Pour la variable dépendante HOMOGENE TAU, aucune interaction et aucun effet principal n'ont été trouvés ($ps > .05$).

Condition Hétérogène

Pour la variable dépendante HÉTÉROGÈNE MU, aucune interaction et aucun effet principal n'ont été trouvés ($ps > .05$).

Pour la variable dépendante HÉTÉROGÈNE SIGMA, aucune interaction et aucun effet principal n'ont été trouvés ($ps > .05$).

Pour la variable dépendante HÉTÉROGÈNE TAU, aucune interaction et aucun effet principal n'ont été trouvés ($p > .05$).

Changements dans les coûts de commutation (Switch costs) pour la précision

Scores de précision

Pour la variable dépendante COÛT GLOBAL PRÉCISION, une interaction significative a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS, $F(1, 22) = 7.838$, $p = .01$, $r = .51$ (voir Figure 7). L'interaction a été examinée avec des ANOVAs simples et à mesures répétées, qui ont montré que les coûts de précision des sujets témoins ($M = 3.30$, $\acute{E}-T = 3.25$) et des sujets commotionnés ($M = 4.74$, $\acute{E}-T = 3.75$) étaient similaires au temps 1 ($p > .05$), mais différaient au temps 2 ($F(1, 22) = 5.026$, $p = .035$, $r = .43$), les sujets témoins montrant des coûts de précision plus élevés ($M = 7.22$, $\acute{E}-T = 4.25$) que les sujets commotionnés ($M = 4.15$, $\acute{E}-T = 2.10$). De plus, seuls les sujets témoins montrent un changement significatif des coûts de précision en fonction du temps ($F(1, 11) = 10.561$, $p = .008$, $r = .70$), c'est-à-dire une augmentation du coût de précision. Autrement dit, les sujets témoins ont montré une augmentation de la différence entre leur précision lors d'une tâche simple (condition homogène) et leur précision lors d'une tâche comportant une charge de travail plus élevée (condition hétérogène).

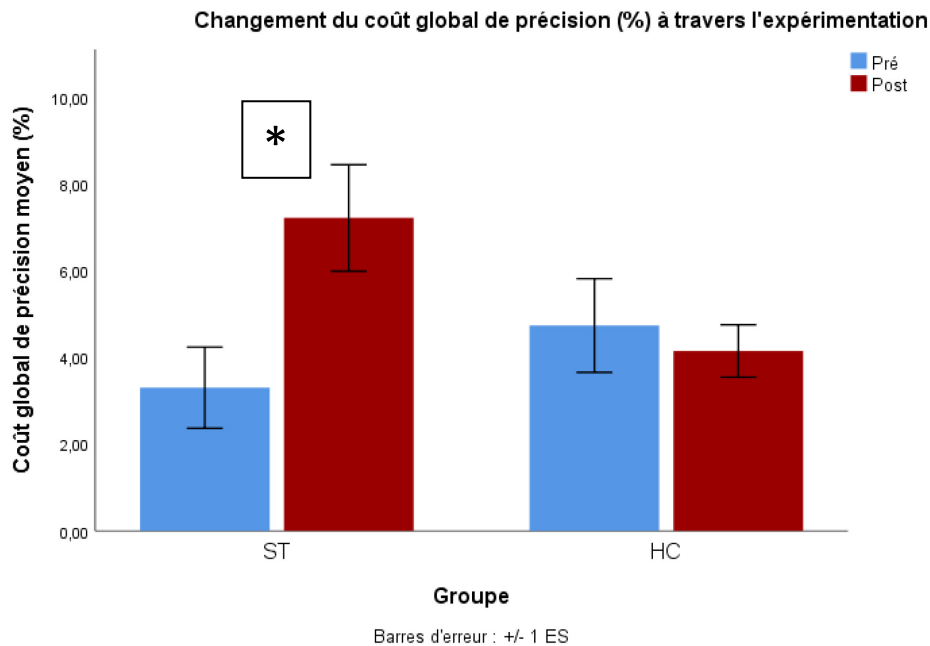


FIGURE 7

Évolution du coût global de précision moyen de la première tâche Switch (en bleu) à la seconde (en rouge), chez les sujets témoins (ST) et les sujets avec un historique de commotion cérébrale (HC). Les sujets témoins présentent une augmentation significative du coût global de précision, $F(1, 11) = 10.561$, $p = .008$, $r = .70$.

Pour la variable dépendante COÛT LOCAL PRÉCISION, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS ($p > .05$). Aucun effet principal significatif n'a été observé sur la variable TEMPS ou sur la variable GROUPE ($p > .05$).

Pour la variable dépendante COÛT CONGRUENCE PRÉCISION, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS ($p > 0.05$). Cependant, un examen des effets principaux révèle un effet significatif de la variable TEMPS sur la variable dépendante, $F(1, 22) = 8.704$, $p = .007$, $r = .53$ (voir Figure 8). L'effet indique une augmentation générale du coût de congruence, du temps 1 ($M = 6.50$; $É-T = 5.51$) au temps 2 ($M = 10.39$; $É-T = 6.10$), ce qui signifie qu'avec le temps, il devient plus difficile pour les participants de répondre correctement aux essais générant une interférence de

réponses par rapport à ceux qui n'en génèrent pas. En examinant individuellement les deux composantes du coût de congruence (la précision lorsque les stimuli sont congruents et lorsque les stimuli sont incongruents), une interaction significative a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS pour la précision lorsque les stimuli sont incongruents, $F(1, 22) = 4.471$, $p = .046$, $r = .41$ (voir Figure 9). Les sujets témoins performant significativement mieux au temps 2 ($M = 91.33$, $\acute{E}-T = 6.64$) qu'au temps 1 ($M = 84.95$, $\acute{E}-T = 7.67$), $F(1, 11) = 8.638$, $p = .013$, $r = .66$.

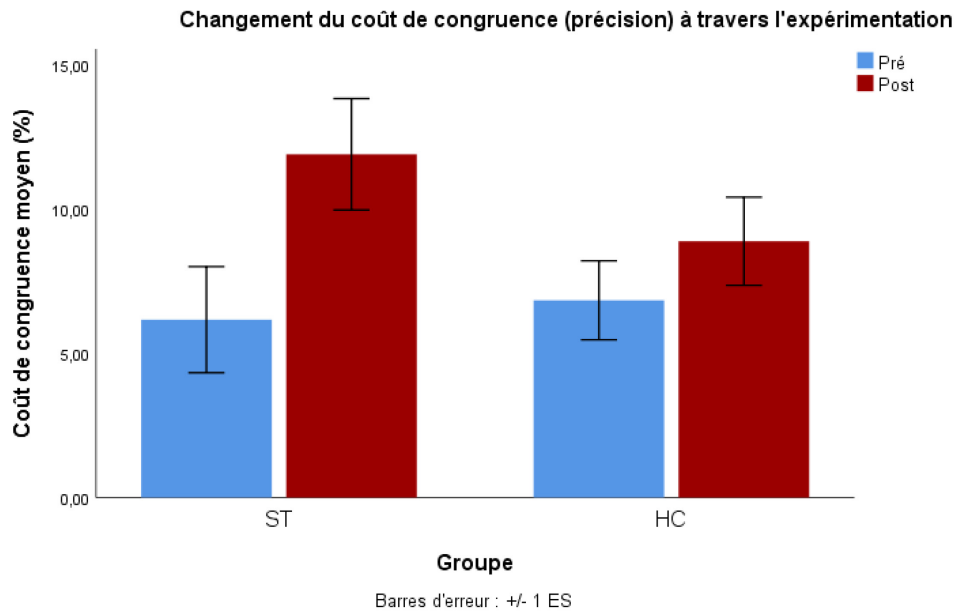


FIGURE 8

Pour les sujets témoins (ST) et les sujets avec un historique de commotion cérébrale (HC), l'évolution du coût de congruence en points de pourcentage au cours de l'expérimentation. Une augmentation générale significative du coût a été mesurée de la première tâche Switch (en bleu) à la seconde (en rouge), $F(1, 22) = 8.704$, $p = .007$, $r = .53$.

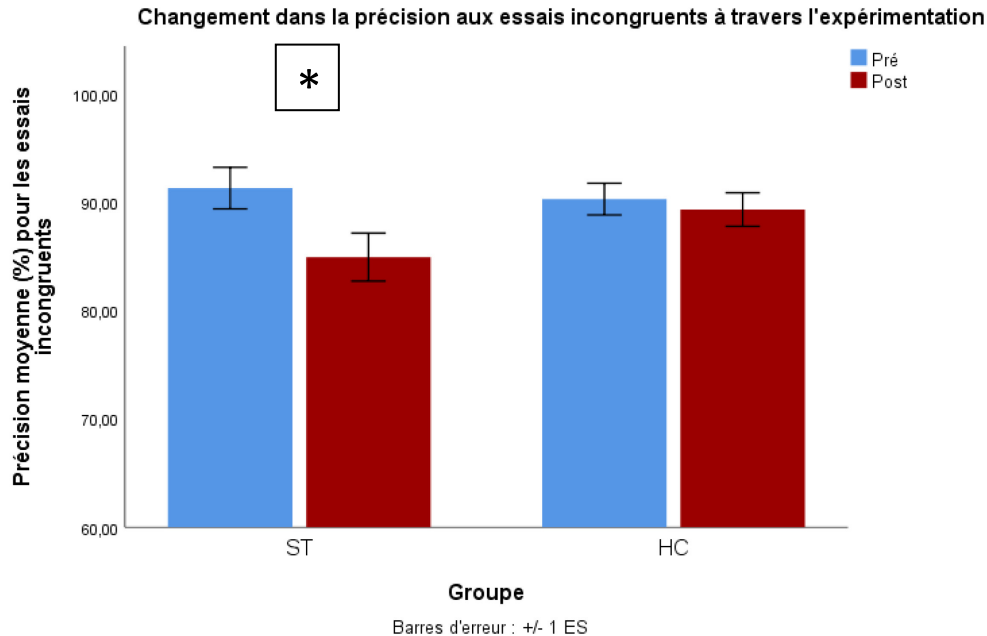


FIGURE 9

L'évolution de la précision pour les essais incongruents, en pourcentage, au cours de l'expérimentation. Une diminution significative de la précision a été mesurée de la première tâche Switch (en bleu) à la seconde (en rouge) chez les sujets témoins. Les sujets témoins présentent une diminution significative de la précision, $F(1, 11) = 8.638$, $p = .013$, $r = .66$.

Temps de réaction

Coût Global

Pour la variable dépendante COÛT GLOBAL MU, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Une augmentation des temps de réponse moyens du temps 1 ($M = 271.70$; $\acute{E}-T = 123.10$) au temps 2 ($M = 321.07$; $\acute{E}-T = 184.10$) a été observée, mais cet effet s'est avéré non-significatif ($F(1, 22) = 3.019$, $p = .096$, $r = .35$).

Pour la variable dépendante COÛT GLOBAL SIGMA, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Aucun effet principal significatif n'a été observé.

Pour la variable dépendante COÛT GLOBAL TAU, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Aucun effet principal significatif n'a été observé.

Coût local

Pour la variable dépendante COÛT LOCAL MU, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Aucun effet principal significatif n'a été observé. Toutefois, le test de Levene sur l'égalité des variances effectué indique que les variances des deux groupes sont inégales au temps 1 ($p = .006$) et au temps 2 ($p = .044$), les sujets avec un historique de commotion cérébrale présentant une variance plus élevée aux deux temps (T1, $\acute{E}-T = 155.83$; T2, $\acute{E}-T = 206.36$) que les sujets témoins (T1, $\acute{E}-T = 67.96$; T2, $\acute{E}-T = 76.39$). Après avoir effectué deux ANOVAs à un facteur (GROUPE) pour chacun des temps et contrôlé pour les différences de variance avec le F de Welch, les différences de moyennes demeuraient non-significatives.

Pour la variable dépendante COÛT LOCAL SIGMA, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Un effet principal significatif de la variable GROUPE a été observé sur la variable dépendante ($F(1, 22) = 5.318$, $p = .031$, $r = .44$), les sujets avec un historique de commotion présentant un coût moyen de l'écart-type des temps de réponses plus élevé ($M = 70.45$; $\acute{E}-T = 82.95$) que les sujets témoins ($M = 15.27$; $\acute{E}-T = 44.04$). Le test de Levene pour l'égalité des variances des groupes montre également une différence significative au temps 1 ($F(1, 22) = 4.902$, $p = .037$, $r = .43$), les sujets avec un historique de commotion cérébral présentant une variance des scores plus élevée ($\acute{E}-T = 74.20$) que les sujets témoins ($\acute{E}-T = 35.03$).

Pour la variable dépendante COÛT LOCAL TAU, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Un effet principal significatif de la variable GROUPE a été observé sur la variable dépendante, les sujets témoins montrant un coût local généralement plus élevé sur la variable tau ($M = -17.36$; $\acute{E}-T = 45.27$) que les sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = -75.39$; $\acute{E}-T = 94.47$), $F(1, 22) = 4.378$, $p = .048$, $r = .41$ (voir Figure 10).

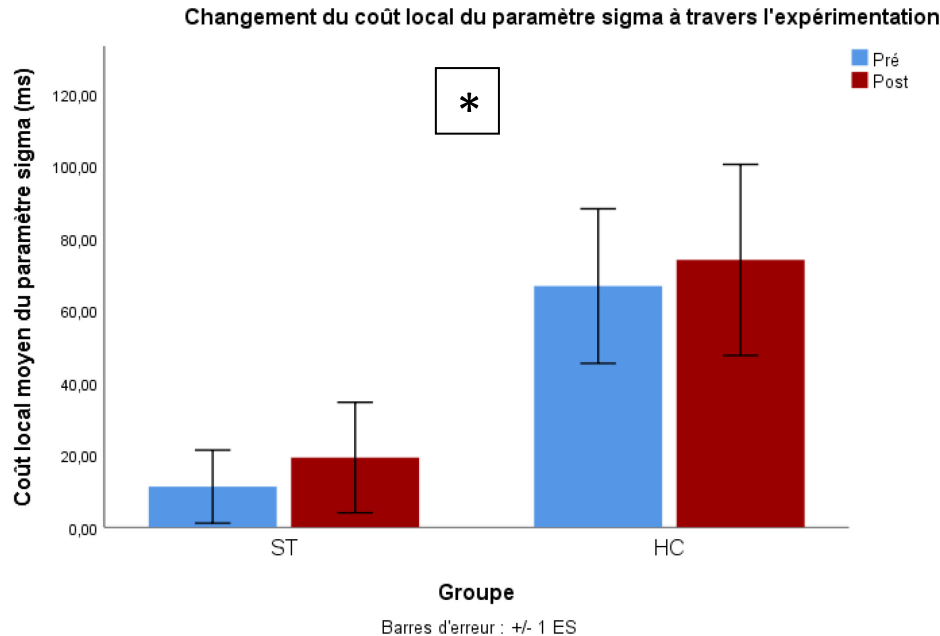


FIGURE 10

Évolution du Coût Local du paramètre Sigma de la première tâche Switch (en bleu) à la seconde (en rouge). Les sujets avec un historique de commotion cérébrale présentent un coût plus élevé aux deux moments, $F(1, 22) = 5.318$, $p = .031$, $r = .44$.

Effet de congruence

Pour la variable dépendante COÛT CONGRUENCE MU, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Aucun effet principal significatif n'a été observé.

Pour la variable dépendante COÛT CONGRUENCE SIGMA, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Un effet principal de la variable GROUPE a été observé, indiquant un coût plus grand pour les sujets avec un historique de commotion ($M = 69.74$; $É-T = 80.13$) que pour les sujets témoins ($M = 27.06$; $É-T = 45.46$), mais ce dernier était non-significatif, $F(1, 22) = 3.958$, $p = .059$, $r = .39$.

Pour la variable dépendante COÛT CONGRUENCE TAU, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS. Aucun effet principal significatif n'a été observé.

Liens entre les indices de performance et la fatigue quotidienne

Les scores aux questionnaires de la fatigue ne corrèlent significativement qu'avec les indices de coût global de la première tâche Switch chez les sujets témoins. La variable COÛT GLOBAL MU corrèle positivement avec les scores de la FSS ($r = .75$, $p = .005$, $r^2 = .56$) et avec les scores de l'échelle de fatigue générale de l'IMF-20 ($r = .73$, $p = .007$, $r^2 = .54$). La variable COÛT GLOBAL SIGMA corrèle, elle aussi, significativement avec la FSS ($r = .68$, $p = .015$, $r^2 = .46$) et l'échelle de fatigue générale de l'IMF-20 ($r = .62$, $p = .031$, $r^2 = .39$). Les scores de la sous-échelle de fatigue cognitive corrèlent, eux aussi, avec les variables COÛT GLOBAL MU ($r = .60$, $p = .04$, $r^2 = .36$) et COÛT GLOBAL SIGMA ($r = .59$, $p = .046$, $r^2 = .34$) lors de la première tâche Switch. Le COÛT GLOBAL MU corrèle significativement avec les scores au PSQI ($r = .58$, $p = .047$, $r^2 = .34$) et les scores au BDI-II ($r = .613$, $p = .034$, $r^2 = .38$) alors que le COÛT GLOBAL SIGMA corrèle seulement avec les scores au BDI-II ($r = .60$, $p = .039$, $r^2 = .36$).

Pour les sujets avec un historique de commotion cérébral les scores à la sous-échelle de fatigue cognitive de l'IMF-20 corrèlent significativement avec la variable COÛT GLOBAL PRÉCISION ($r = .76$, $p = .004$, $r^2 = .58$) lors de la seconde tâche Switch (voir Figure 11). Cet indice de performance corrèle également avec les scores au BDI-II ($r = .64$, $p = .025$, $r^2 = .41$) et avec les scores de la ESS ($r = .75$, $p = .005$, $r^2 = .57$) tel que présenté dans la figure 12, ce qui n'est pas le cas pour les sujets témoins ($p > .05$). En divisant le BDI-II en deux facteurs (Cognitif et Sommatif-Affectif), seul le facteur Sommatif-Affectif corrélait avec l'indice de performance ($r = .71$, $p = .009$, $r^2 = .51$).

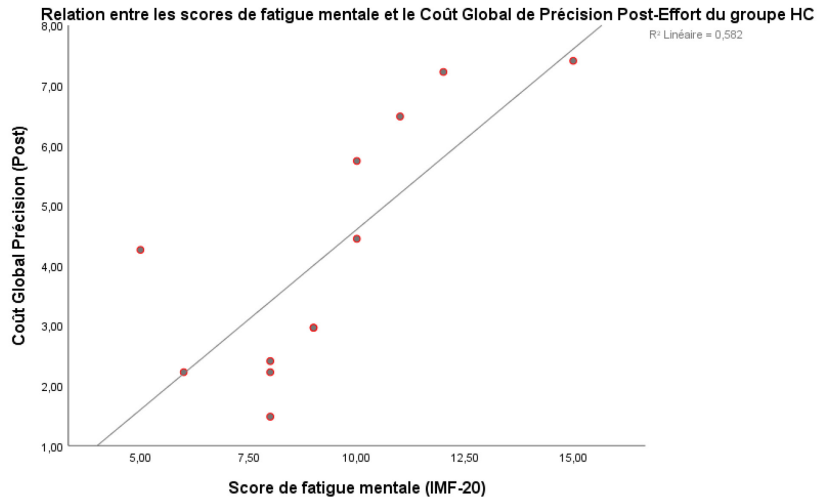


FIGURE 11

Relation entre la fatigue mentale quotidienne rapportée (IMF-20) et le coût global de précision lors de la seconde tâche Switch pour les sujets avec un historique de commotion cérébrale, $r = .76$, $p = .004$, $r^2 = .58$.

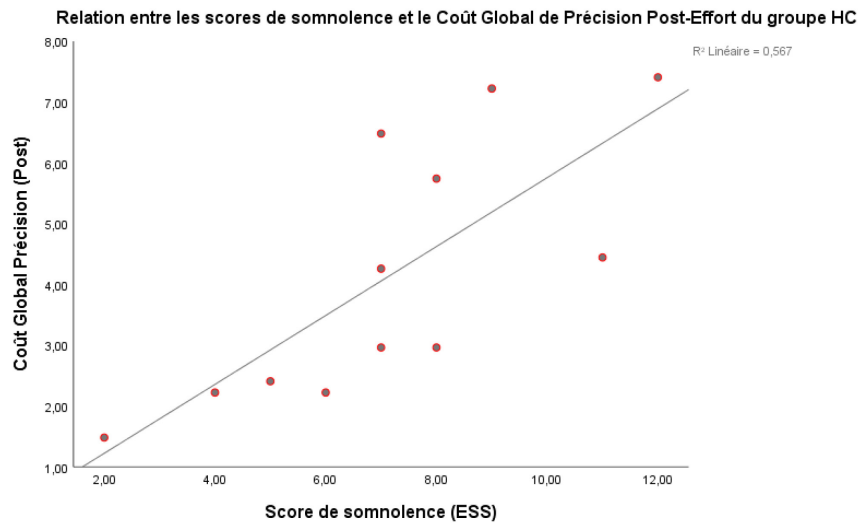


FIGURE 12

Relation entre les scores de somnolence (ESS) et le coût global de précision lors de la seconde tâche Switch pour les sujets avec un historique de commotion cérébrale, $r = .75$, $p = .005$, $r^2 = .57$.

Résultats EEG

État de repos

Bien que le groupe témoin présente une puissance spectrale en apparence plus importante au niveau de la région occipitale sur la bande alpha-1 (8-10Hz), aucune différence significative n'a été trouvée entre les deux groupes ($p > .05$).

Homogène Pré vs. Homogène Post

Aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS, que ce soit au niveau de l'activité thêta ou de l'activité alpha. Cependant, un effet principal de la variable GROUPE sur l'activité alpha 2 (entre 11 et 13Hz) a été trouvé au niveau de la région centrale, les participants du groupe témoin présentant généralement une puissance spectrale plus importante ($M = 45.3$, $\acute{E}-T = 4.55$) lors de la tâche homogène que les sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = 41.78$, $\acute{E}-T = 3.71$), $F(1,22) = 4.724$, $p = .041$, $r = .42$. Un effet principal de la variable GROUPE sur l'activité alpha-2 a également été trouvé pour la région pariétale, les participants du groupe témoin présentant généralement une puissance spectrale plus importante ($M = 46.39$, $\acute{E}-T = 5.09$) lors de la tâche homogène que les sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = 42.23$, $\acute{E}-T = 4.7$), $F(1,22) = 5.007$, $p = .036$, $r = .43$. Ces résultats sont illustrés dans la figure 13.

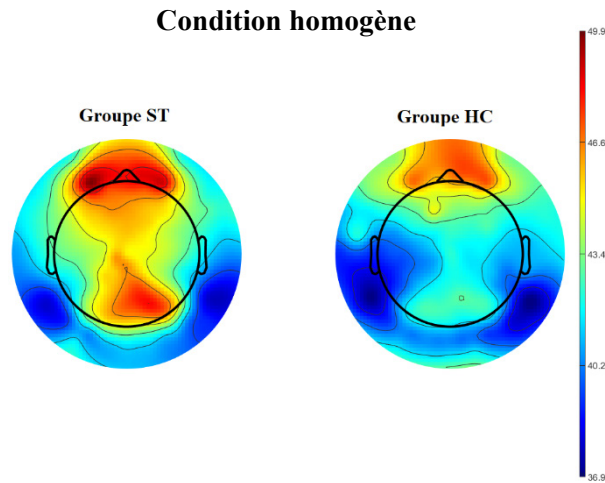


FIGURE 13

Différence de groupe pour la condition homogène. Les sujets témoins présentent une puissance spectrale ($10 \cdot \log_{10}(\mu V^2/Hz)$) supérieure aux régions centrale ($F(1,22) = 4.724$, $p = .041$, $r = .42$) et pariétale ($F(1,22) = 5.007$, $p = .036$, $r = .43$).

Hétérogène Pré vs. Hétérogène Post

Aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables TEMPS et GROUPE, que ce soit au niveau de l'activité thêta ou de l'activité alpha ($p > .05$). Aucun effet principal significatif n'a été trouvé.

Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC)

Repos (FFT)

Lors de la période de repos à yeux ouverts, les sujets avec un historique de commotion cérébrale ont présenté une puissance relative des hautes fréquences (%HF) significativement plus élevée ($M = 42.58$, $É-T = 18.26$) que les sujets témoins ($M = 24.75$, $É-T = 15.34$), $F(1, 19) = 5.590$, $p = .029$, $r = .48$.

Effets pré-post

Homogène

Pour la variable dépendante SD2/SD1, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables GROUPE et TEMPS ($p > .05$). Un effet principal significatif de la variable GROUPE a été trouvé, les sujets témoins présentant un ratio plus élevé ($M = 2.05$, $\acute{E}-T = .91$) que les sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = 1.35$, $\acute{E}-T = .36$), $F(1, 19) = 6.663$, $p = .018$, $r = .51$. Afin de savoir si cette différence est attribuable au numérateur ou au dénominateur du ratio, les variables SD1 et SD2 ont été analysées de façon séparée. Pour la variable dépendante SD2, un effet principal significatif de la variable TEMPS a été trouvé, les sujets présentant en général des valeurs plus basses au temps 1 ($M = 71.74$, $\acute{E}-T = 45.03$) qu'au temps 2 ($M = 87.01$, $\acute{E}-T = 50.64$), $F(1, 19) = 23.088$, $p = .000$, $r = .74$. Pour la variable dépendante SD1, un effet principal significatif de la variable TEMPS a été trouvé, les sujets présentant en général des valeurs moins élevées lors du temps 1 ($M = 54.45$, $\acute{E}-T = 46.48$) que lors du temps 2 ($M = 63.15$, $\acute{E}-T = 48.49$), $F(1, 19) = 6.468$, $p = .020$, $r = .50$.

Hétérogène

Pour la variable dépendante SD2/SD1, aucune interaction significative n'a été trouvée entre les variables TEMPS et GROUPE ($p > .05$). Un effet principal significatif de la variable GROUPE a été trouvé, les sujets témoins présentant un ratio plus élevé ($M = 2.47$, $\acute{E}-T = 1.14$) que les sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = 1.58$, $\acute{E}-T = .20$), $F(1, 19) = 8.206$, $p = .009$, $r = .56$. Afin de savoir si cette différence est attribuable au numérateur ou au dénominateur du ratio, les variables SD1 et SD2 ont été analysées de façon séparée. Pour la variable dépendante SD2, un effet principal significatif de la variable TEMPS a été trouvé, les sujets présentant en général des valeurs plus basses au temps 1 ($M = 74$, $\acute{E}-T = 48.24$) qu'au temps 2 ($M = 85.31$, $\acute{E}-T = 48$), $F(1, 19) = 18.150$, $p = .000$, $r = .70$. Pour la variable dépendante SD1, aucune interaction ou effet principal n'ont été trouvés.

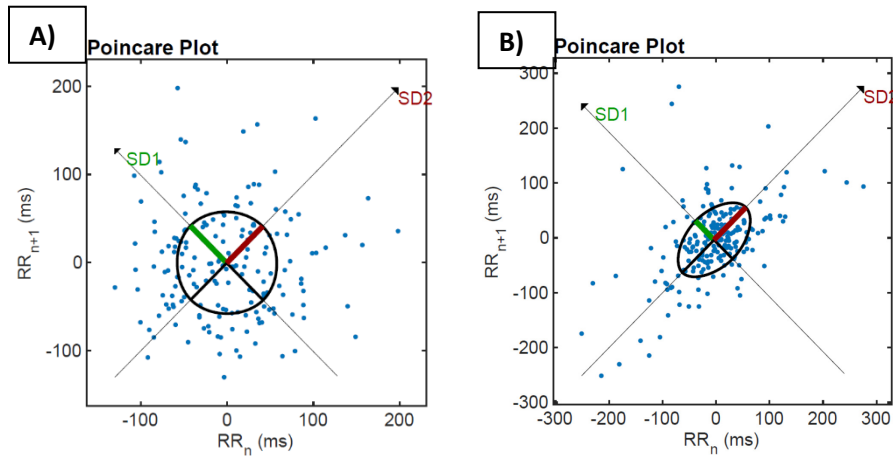


FIGURE 14

Ci-dessus, les graphiques de dispersion de Poincaré lors d'un bloc de la condition homogène (A) et lors d'un bloc de la condition hétérogène (B) d'un participant lors de la première complétion de la tâche Switch. Les valeurs de chaque intervalle inter-battements (R-R) N en millisecondes (axe des abscisses) sont placées en fonction de l'intervalle N-1 (axe des ordonnées). Une ellipse est formée autour des points en fonction de leur dispersion, à partir de deux paramètres principaux, soient SD1, correspondant à la VFC à court terme et à l'écart-type des valeurs se situant autour de la ligne d'identité, et SD2, correspondant à la VFC à court et à long terme et à l'écart-type des valeurs le long de la ligne d'identité. Dans l'exemple ci-dessus, SD1 (59.5ms) et SD2(58.9ms) donnent un ratio SD2/SD1 de .99 durant le bloc homogène. Pour le bloc hétérogène, une diminution de SD1 (48.9ms) et une augmentation de SD2(84ms) ont pour effet d'augmenter le ratio SD2/SD1 (1.72).

Relation entre HF% et la performance :

La puissance relative des hautes fréquences de la VFC au repos corrèle positivement avec la précision à la condition hétérogène de la première tâche Switch, $r = .45$, $p = .043$, $r^2 = .20$, et de la seconde tâche Switch, $r = .62$, $p = .003$, $r^2 = .384$. HF% corrèle positivement avec la précision lors des essais Switch post-fatigue, $r = .50$, $p = .02$, $r^2 = .25$. HF% corrèle négativement avec le coût global de précision post-fatigue, $r = .70$, $p = .000$, $r^2 = .49$ (voir Figure 15). Visuellement, les deux groupes semblaient présenter des pentes différentes pour cette relation. La relation entre HF(%) et le coût global de précision post-fatigue a donc été testée séparément pour chacun des groupes. La pente de la relation pour les sujets témoins ($r = .72$, $p = .030$, $r^2 = .51$) semblait plus élevée que celle des sujets avec un historique de commotion cérébrale ($r = .61$, $p = .034$, $r^2 = .38$), mais la taille d'échantillon était cependant insuffisante pour tester la différence entre les pentes à l'aide d'une transformation en Z de Fisher.

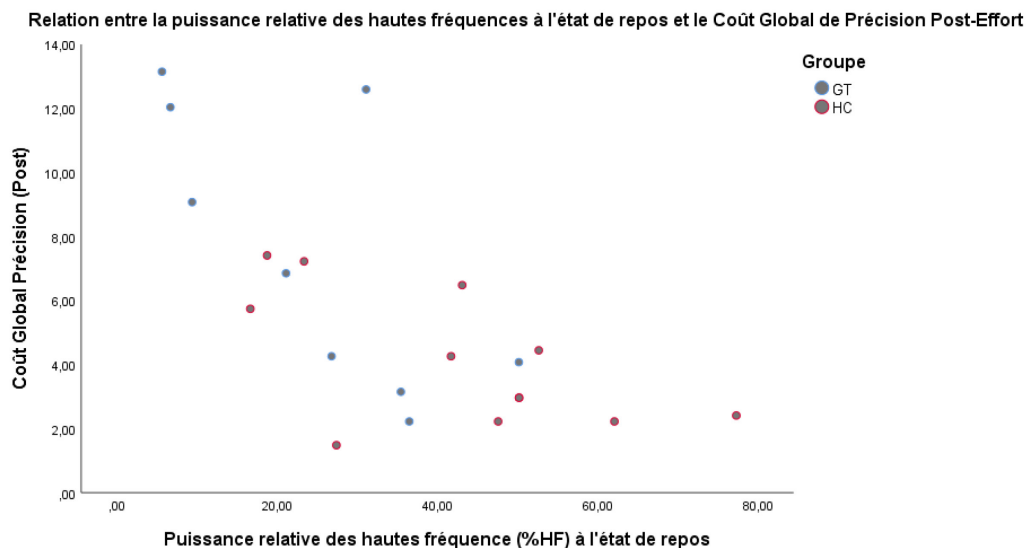


FIGURE 15

Relation entre la puissance relative des hautes fréquences (%HF) à l'état de repos et le coût global de précision lors de la seconde tâche Switch, $r = .70$, $p = .000$, $r^2 = .49$.

Relation entre SD1 ou SD2 et la performance :

Le fait d'avoir retiré 3 sujets du groupe témoin (en raison du manque ou de la mauvaise qualité des données) pour mener les analyses de la VFC n'a pas eu d'impact significatif sur les différences de performance trouvées entre les groupes. Les sujets témoins ont toujours une précision moins élevée ($M = 90.78$, $\acute{E}-T = 4.23$) lors de la condition hétérogène que les sujets avec un historique de commotion cérébrale ($M = 93.86$, $\acute{E}-T = 3.06$), $t(19) = -1.938$, $p = .034$ (unilatéral), $r = .41$. Les sujets avec un historique de commotion, quant à eux, ont toujours des valeurs μ plus élevées lors de la tâche homogène ($M = 337.41$, $\acute{E}-T = 37.86$) que les sujets témoins ($M = 310.90$, $\acute{E}-T = 12.47$), $t(19) = -2.267$, $p = .04$, $r = .46$.

Aucune relation claire n'a été trouvée entre les changements sur les variables SD1 et SD2 et la performance ($p > .05$).

Discussion

Les résultats de la présente étude ne permettent pas de confirmer les hypothèses selon lesquelles la fatigue quotidienne auto-rapportée serait plus importante chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale (hypothèse 1), que la performance de ces derniers à la tâche Switch serait globalement moins bonne et qu'elle ne dépendrait pas d'une interaction entre les groupes et le temps sur la tâche (hypothèse 3). De plus, c'est plutôt pour les sujets avec un historique de commotion cérébrale que les symptômes de dépression corrèlent davantage avec la fatigue quotidienne (hypothèse 7). Les données physiologiques obtenues n'appuient pas non plus les hypothèses voulant qu'il y aurait une augmentation plus importante de l'activité thêta frontopariétale (hypothèse 9), une antériorisation plus importante de l'activité maximale de la bande alpha (hypothèse 10) et une augmentation graduelle plus importante de l'activité du SNS (telle que mesurée avec la VFC) par rapport à celle du SNP (hypothèse 11) au cours de l'expérimentation pour les sujets avec un historique de commotion cérébrale. Enfin, la taille d'échantillon trop petite ne nous a pas permis de tester si la fatigue subjective quotidienne corrèlerait toujours avec la performance à la condition hétérogène du Switch en contrôlant pour les variables confondantes potentielles (hypothèse 8).

Cependant, les résultats ont aussi permis de confirmer certaines de nos hypothèses. Tout d'abord, les sujets avec un historique de commotion cérébrale présentent des scores plus élevés aux questionnaires auto-rapportés sur les symptômes d'anxiété et sur la qualité du sommeil (hypothèse 1) et la fatigue situationnelle subjective a augmenté au cours de l'expérimentation chez les deux groupes (hypothèse 2). Les scores de fatigue subjective quotidienne corrèlent négativement avec la performance (hypothèse 5). Les scores de fatigue et la performance corrèlent également avec les scores de somnolence, les symptômes de dépression ainsi que les scores de troubles du sommeil pour l'ensemble des sujets (hypothèse 6). Les sujets avec un historique de commotion cérébrale ont d'ailleurs montré une corrélation négative entre la fatigue mentale quotidienne rapportée et la précision à la tâche à la suite d'un effort cognitif soutenu. De plus, nous avons constaté la présence d'un effet différentiel de la tâche Switch sur la performance des deux groupes,

identifiable dans les conditions homogène et hétérogène. Ces résultats suggèrent que le groupe de participants avec un historique de commotion cérébrale est hétérogène et qu'un sous-groupe d'entre eux pourrait être plus vulnérable aux effets de la fatigue cognitive (en lien avec l'hypothèse 4).

L'épreuve de raisonnement, l'effort cognitif et la fatigue subjective situationnelle

Les résultats aux échelles de Likert sont en accord avec l'objectif principal de l'épreuve de raisonnement, qui était de solliciter un effort mental intense et soutenu chez les participants afin de générer une fatigue objectivement mesurable. Tout d'abord, au cours de l'expérimentation, la fatigue situationnelle a augmenté à la suite d'un effort mental intense et prolongé chez les deux groupes. Il faut toutefois souligner que le niveau de fatigue subjective n'a pas augmenté significativement à la suite de l'épreuve de raisonnement, mais qu'il est demeuré le même après une augmentation survenue lors de la première tâche Switch. Le niveau de motivation (troisième échelle de Likert), lui, a diminué au cours de l'expérimentation, et n'a pas non plus montré de changement significatif avant et après l'épreuve de raisonnement. Au vu de ces résultats, nous sommes portés à croire que l'épreuve de raisonnement aurait moins contribué aux changements dans la fatigue situationnelle subjective que la complétion de la première tâche Switch. Toutefois, l'augmentation graduelle du niveau d'effort subjectif rapporté (deuxième échelle de Likert) montre que l'épreuve de raisonnement a su solliciter un effort mental significatif chez les participants. Le peu de différences entre les niveaux de fatigue et de motivation avant et après l'épreuve de raisonnement pourraient être expliqués par la nature de l'épreuve : les participants avaient davantage de contrôle sur le rythme avec lequel ils pouvaient répondre à chacune des questions, contrairement à 2 secondes par stimulus pour la tâche Switch. De plus, l'épreuve de raisonnement est plus écologique et pourrait être considérée moins monotone, puisque basée sur des mises en situation plutôt que sur la réaction à des stimuli présentés à répétition sur un écran d'ordinateur, chose qui arrive peu ou jamais dans la vie quotidienne. De ce fait, il est possible que les participants aient pu s'engager plus

facilement dans l'épreuve et ne pas ressentir les effets délétères qu'aurait une tâche moins écologique, avec une contrainte temporelle plus élevée, sur leur fatigue subjective et leur motivation.

La fatigue quotidienne subjective

Les scores plus élevés aux questionnaires auto-rapportés de symptômes d'anxiété et sur la qualité du sommeil pour les sujets avec un historique de commotion cérébrale concordent avec la littérature, qui suggère que cette population serait particulièrement touchée par ce type de problèmes (Gosselin et al., 2009; Osborn, Mathias et Fairweather-Schmidt, 2016; Ozen et Fernandes, 2011a). L'absence de différences significatives entre les deux groupes pour les symptômes de dépression ainsi que les scores d'inattention, d'insomnie, de somnolence et de fatigue quotidienne, elle, va à l'encontre de notre hypothèse initiale. Tel qu'attendu, pour l'ensemble des participants, les questionnaires portant sur la fatigue quotidienne (FSS et IMF-20) corrélaient significativement avec les scores de qualité du sommeil, d'insomnie, les symptômes de dépression et les scores de somnolence, indiquant que plus une personne rapporte de problèmes à ces questionnaires, plus elle obtiendra un score de fatigue élevé. Les analyses corrélationnelles qui visaient à examiner le lien entre la fatigue quotidienne et les symptômes de dépression de chaque groupe infirment l'hypothèse selon laquelle la fatigue quotidienne corrélait davantage avec les symptômes de dépression chez les sujets témoins, puisqu'aucune corrélation significative n'a été trouvée avec ce groupe. Au contraire, ce sont les sujets avec un historique de commotion cérébrale qui ont montré une corrélation positive entre leur fatigue quotidienne (IMF-20 ; fatigue générale) et les symptômes de dépression. Tel qu'expliqué dans l'introduction de ce mémoire et appuyé par une corrélation forte entre les scores de fatigue générale et le facteur Somatif-Affectif du BDI-II, cette relation pourrait être en partie due au chevauchement des construits que sont la fatigue et la dépression, mais l'on devrait s'attendre à une relation semblable entre les scores de ces deux questionnaires chez les sujets témoins. Ce résultat souligne donc l'importance d'étudier l'impact que peut avoir la fatigue, en tant que construit à part entière, sur la présence d'autres troubles rapportés à la suite de commotions cérébrales. La possibilité d'une relation particulière entre la fatigue

quotidienne, la dépression, la performance ainsi que la somnolence est abordée plus loin dans la section traitant de l'hétérogénéité de la population avec un historique de commotion cérébrale.

Une relation différente entre la fatigue quotidienne et la performance

Les deux groupes présentaient des scores similaires de fatigue quotidienne, mais la relation entre cette dernière et la performance à la tâche Switch différait. Les sujets avec un historique de commotion cérébrale ont montré une corrélation entre le coût global de précision à la seconde tâche Switch et les scores de la sous-échelle de fatigue mentale. Les scores à cette sous-échelle expliquent 58% de la variance du coût global de précision, c'est-à-dire que plus le sujet rapporte de signes de fatigue cognitive au quotidien, plus la différence de précision sera élevée entre les conditions hétérogène et homogène à la suite d'un effort cognitif prolongé. Les analyses corrélationnelles ont aussi révélé que les problèmes de somnolence et les symptômes de dépression auto-rapportés seraient associés à un coût global de précision élevé au cours de l'expérimentation. Chez les sujets témoins, c'est la fatigue générale qui corrèle avec la performance, mais seulement lors de la première tâche Switch. Les sujets témoins rapportant de la fatigue ont aussi une différence de temps de réponses et de variabilité intra-individuelle des temps de réponse plus importante entre les conditions hétérogène et homogène. Ces indices de performance corrélaient aussi avec les symptômes de dépression et de qualité du sommeil, suggérant que des problèmes à ce niveau sont aussi liés à une mauvaise performance chez ce groupe. Dans l'ensemble, ces résultats supportent l'hypothèse d'une relation entre la fatigue quotidienne et la performance à des tâches cognitives chez les victimes de TCC (Bushnik et al., 2008; Johansson, Berglund et Ronnback, 2009; Ziino et Ponsford, 2005), en plus d'indiquer que cette relation s'exprime à la suite d'un effort cognitif.

Un effet différentiel de la tâche sur la performance des groupes

En observant le type d'erreurs ou de temps de réponse associés à chacun des groupes, on constate un effet différentiel, entre les groupes, de la tâche Switch sur la performance.

La performance à la condition homogène

Les sujets avec un historique de commotion cérébrale n'ont montré aucun signe d'effet de pratique lors de la condition homogène qui sollicite un contrôle plus automatique. Tout au long de l'expérimentation, ils ont montré des temps de réponse moyens plus élevés sans amélioration de leur précision. À l'inverse, les sujets témoins ont su améliorer leur précision tout en conservant des temps de réponse inférieurs. Ce résultat suggère qu'un effort mental soutenu est associé à une diminution de la capacité de traitement de l'information chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale lors d'une stimulation monotone et sollicitant des processus de contrôle plus automatique. Plusieurs études ont déjà montré des différences comportementales (Bernstein, 2002b; Stuss et al., 1989) ou neurophysiologiques à long terme associées à un traitement de l'information altéré (Baillargeon, Lassonde, Leclerc et Ellemberg, 2012; Dupuis, Johnston, Lavoie, Lepore et Lassonde, 2000; Theriault, De Beaumont, Gosselin, Filipinni et Lassonde, 2009). O'Jile et al. (2006) ont également mesuré la fatigabilité de performance durant un protocole d'une durée de 4h avec deux passations du *Paced Auditory Serial Addition Test* ou PASAT (tâche de mémoire de travail et d'attention soutenue) et ont trouvé un résultat très semblable à ceux de la présente étude. Ils ont montré que les sujets avec un historique de TCC léger performaient moins bien au premier bloc de chaque tâche et s'amélioraient moins que les sujets témoins. D'ailleurs, ils ne montraient aucune amélioration au dernier bloc de la tâche, dont les intervalles inter-stimuli sont les plus courts. Ainsi, ceci pourrait indiquer une difficulté semblable à recruter les ressources attentionnelles lorsqu'une réponse rapide doit être donnée. Cette difficulté s'accentuerait à travers le temps, d'où l'absence d'effet de pratique notable par rapport aux sujets témoins. Il faut toutefois souligner que le PASAT, bien qu'utilisé pour tester la vigilance, n'est pas un test aussi simple que la condition homogène et qu'il comprend du calcul arithmétique, qui est un

processus cognitif moins automatique que de discriminer des formes et des couleurs, ce qui limite la portée de la comparaison entre les études.

Une réaction différente à l'augmentation de la charge cognitive

Les deux groupes présentent des différences de performance pour la tâche hétérogène, qui nécessite un plus grand contrôle cognitif. À la suite d'un effort cognitif soutenu, les sujets témoins ont montré une diminution de la précision pour les stimuli incongruents à la condition hétérogène. Or, les sujets avec un historique de commotion cérébrale n'ont montré aucun changement dans leur précision à cette condition, mais les ANOVAs effectuées pour comparer les différents coûts (global, local, de congruence) ont permis de montrer chez ce groupe une variabilité intra-individuelle et inter-individuelle des temps de réponse plus élevée, et ce tout au long de l'expérimentation.

L'augmentation de la précision des sujets témoins pour la condition homogène, jumelée à une détérioration de leur précision pour la condition hétérogène, s'est traduite en une augmentation significative du coût global de précision entre la première tâche Switch et la seconde. Dans le même ordre d'idées, la comparaison des scores de précision à travers le temps a aussi révélé un effet principal du temps sur le coût de congruence. En effet, les participants des deux groupes avaient une différence de précision entre les essais congruents et les essais incongruents (dont les caractéristiques du stimulus sont associées à une interférence de réponses) plus élevée pour la condition hétérogène de la seconde tâche Switch. Dans le cas des sujets témoins, mais pas chez ceux avec un historique de commotion cérébrale, la précision lors des essais incongruents a diminué de la première tâche Switch à la seconde. Les essais incongruents constituant environ la moitié des essais de la condition hétérogène, cette difficulté à demeurer précis en contexte d'interférence de réponses est donc un facteur contributif à la diminution de la précision générale à la condition hétérogène. Ce résultat pourrait évidemment être expliqué comme étant une conséquence de la fatigue cognitive provoquée par l'expérimentation, les sujets témoins, devenant moins bons pour traiter les essais nécessitant un contrôle cognitif plus important. Des différences entre les groupes dans les stratégies de réponse pourraient aussi expliquer pourquoi les sujets avec un historique de commotion cérébrale ne présentent pas ce pattern

de fatigabilité de performance. Ces différences de stratégies seront d'ailleurs traitées dans le paragraphe suivant.

Les temps de réponse des sujets avec un historique de commotion varient plus fortement autour de la moyenne pour les essais *switch* que pour les essais *non-switch*. En principe, cette variabilité intra-individuelle accrue des temps de réponse pour le coût local, mesurée à partir du paramètre σ , indique une instabilité dans la capacité à répondre le plus rapidement possible lorsqu'il y a commutation de tâches. Le fait que cette instabilité soit située autour de la moyenne, contrairement aux sujets témoins, signifie que c'est l'ensemble des temps de réponse qui varie davantage chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale. Cette différence entre les groupes pourrait notamment être attribuable à un choix de stratégie de réponse : les sujets témoins, en priorisant la vitesse de leurs réponses, auraient pu répondre avec un rythme constant au détriment de la précision, ce qui aurait eu pour effet de diminuer l'écart-type (σ) des temps de réponse propres à chaque sujet. Les sujets avec un historique de commotion cérébrale, quant à eux, auraient priorisé la précision aux temps de réponse. Ils auraient essayé de répondre correctement à chaque stimulus, quitte à prendre plus de temps pour le faire. Cette variabilité plus grande des temps de réponse lors des essais *switch* pourrait donc être également le signe d'une réponse plus adaptée. À ce propos, Ozen et Fernandes (2011b), avec une tâche de mémoire de travail, ont obtenu des résultats similaires. Ils ont montré que de jeunes adultes avec un historique de TCC léger présentaient des temps de réponse plus élevés, pour une précision égale, lors d'une condition dont la charge de travail était faible. Au contraire, lors de la condition avec une charge de travail élevée, ils étaient plus précis que les sujets témoins, mais prenaient plus de temps pour répondre à la présentation des stimuli. Comme la tâche utilisée dans leur étude ne comportait pas de contraintes temporelles explicites, les auteurs ont conclu que de répondre plus lentement était une stratégie de réponse visant à maximiser la performance. Dans le cadre de la présente étude, il demeure toutefois curieux que ce ne soit pas le coût local de la moyenne des temps de réponse qui soit plus élevé, mais l'écart-type. Ce résultat pourrait être dû à la contrainte de temps de la tâche utilisée, qui aurait forcé les sujets à répondre plus rapidement tout en essayant de faire le moins d'erreurs possible tel qu'expliqué plus haut. Enfin, cette stratégie de réponse plus adaptée pourrait expliquer, chez les sujets avec un historique de

commotion, l'absence de diminution notable de la performance en fonction du temps sur la tâche. Contrairement aux sujets témoins, le fait de prioriser la précision aux temps de réponse aurait pu avoir pour effet de répartir davantage la diminution de la performance à travers les différents indices utilisés (temps de réponse moyen, variabilité intra-individuelle des temps de réponse, précision) et d'empêcher un pattern spécifique de diminution de la performance de s'établir. Bien que présentant des scores de fatigue situationnelle subjective similaires, les sujets avec un historique de commotion pourraient aussi ne pas avoir présenté de signes objectifs de fatigabilité parce qu'ils se sont tout simplement moins fatigués que les sujets témoins.

Le coût local de la moyenne des temps de réponse (obtenu à partir du paramètre μ) montre également une variabilité inter-individuelle (la variance du paramètre μ au sein de chaque groupe) plus grande, à travers l'expérimentation. Autrement dit, la différence entre la moyenne des temps de réponse des essais *switch* et des essais *non-switch* varie davantage chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale. Contrairement aux sujets témoins qui présentent une certaine homogénéité dans leur façon de répondre à la tâche, la grande variabilité des réponses des sujets avec un historique de commotion cérébrale signifie qu'il y a une disparité de performance au sein de ce groupe. Cette disparité pourrait s'expliquer par le recours à des stratégies de réponse différentes chez certains sujets du groupe, qui répondraient en priorisant le temps de réaction plutôt que la précision. Cependant, une telle variabilité n'a pas été trouvée pour les scores de précision. Cette variabilité inter-individuelle pourrait également s'expliquer par une hétérogénéité du groupe au niveau-même de la performance, c'est-à-dire qu'un sous-groupe aurait tendance à sous performer. De plus, cette variabilité pourrait être en même temps expliquée par la notion de variabilité intra-individuelle dont il a été question plus haut. Rabinowitz et Arnett (2013) rapportent qu'avant et à la suite d'une commotion cérébrale, une minorité d'athlètes (35%) présentaient une variabilité intra-individuelle élevée à une série de tests cognitifs, et que contrairement au groupe présentant une plus faible variabilité intra-individuelle, ce sous-groupe performait moins bien que les sujets témoins à la suite de leur commotion. De façon similaire, Hill, Rohling, Boettcher et Meyers (2013) ont montré chez des sujets victimes de TCC légers à sévères que la variabilité intra-individuelle de la performance à

travers une batterie de tests corrélait négativement avec la performance moyenne à cette batterie ($r = -.672$).

Dans le cas de la présente étude, un sous-groupe de participants pourrait performer moins bien et présenter une variabilité intra-individuelle plus élevée, ce qui donnerait le pattern de variabilité inter-individuelle plus élevée des sujets avec un historique de commotion cérébrale lorsqu'ils sont comparés aux sujets témoins. Une variabilité intra-individuelle plus importante est soupçonnée par certains chercheurs d'être une signature comportementale des commotions ou TCC légers (Parks et al., 2015; Stuss et al., 1989), mais les résultats sont mitigés (Karr et al., 2014).

Différences au niveau de l'activité physiologique

EEG

Aucune différence significative de puissance spectrale de la bande alpha 1 n'a été trouvée entre les deux groupes à l'état de repos. Toutefois, les sujets avec un historique de commotion cérébrale ont présenté une puissance spectrale moins importante de la bande alpha 2 (11-13Hz) au niveau des régions centrale et pariétale du scalp durant la condition homogène des deux tâches Switch. D'après Fairclough et Ewing (2017), la désynchronisation de l'activité alpha 2 serait un processus « omniprésent » et associé à la charge de travail, c'est-à-dire qu'une charge de travail élevée serait associée à une puissance spectrale élevée. D'après cette hypothèse et le fait que cette différence de groupe coïncide avec la moins bonne performance des sujets avec un historique de commotion cérébrale, ces derniers nécessiteraient un contrôle cognitif plus important pour accomplir la même tâche. Cependant, les conclusions de Fairclough et Ewing sont basées sur une tâche de mémoire de travail et à notre connaissance, ces résultats n'ont pas été répliqués avec une tâche plus simple et n'impliquant pas les fonctions exécutives.

Contrairement aux conditions homogènes, aucune différence n'a été trouvée en comparant l'activité des bandes thêta et alpha des deux groupes durant les conditions hétérogènes de la première et de la seconde tâche Switch. L'augmentation pour l'ensemble des participants

de l'activité thêta frontomédiane de la première tâche Switch à la seconde, associée au phénomène de fatigue cognitive, n'a pas non plus été trouvée, que ce soit en comparant les conditions homogènes ou les conditions hétérogènes des deux tâches entre elles. Pour expliquer cette absence de changement, une hypothèse peut être formulée. L'activité thêta est fonction de la difficulté d'une tâche (Cooper et al., 2019; Sauseng et al., 2006), mais de façon curvilinéaire (Fairclough et Ewing, 2017), c'est-à-dire qu'elle diminue lorsqu'une tâche difficile devient peu probable à réaliser. La fatigabilité de performance des sujets témoins, combinée à leur stratégie de réponse priorisant la vitesse, pourraient être associés à une activité thêta diminuée. D'ailleurs, c'est pour les stimuli incongruents, soit ceux provoquant le plus d'interférence, que les sujets témoins ont montré une diminution de la performance. De cette façon, la signature topographique habituellement associée à la fatigue cognitive pourrait être cachée par cette relation curvilinéaire. Dans le cas des sujets avec un historique de commotion cérébrale, des trajectoires intra-individuelles différentes, comme expliqué plus haut par une variabilité inter-individuelle plus grande et une relation linéaire entre la fatigue mentale et la performance à la suite d'un effort cognitif soutenu, pourraient masquer le manque d'effet du temps sur l'activité thêta et alpha sur l'ensemble du groupe. Alors qu'une partie des participants connaîtrait un effet semblable à celui du groupe témoin, une autre partie du groupe pourrait montrer une augmentation de l'activité thêta. Cependant, cette hypothèse de la curvilinéarité ne permettrait pas d'expliquer l'absence d'effet du temps sur l'activité de la bande alpha, puisque d'après Fairclough et Ewing (2017), la puissance spectrale de la bande alpha 1 devrait diminuer lorsque la charge de travail augmente et augmenter lorsque la probabilité de répondre correctement diminue. Ainsi, on devrait quand même s'attendre à voir une signature topographique de la fatigue cognitive, soit une antériorisation de l'activité alpha. Puisque cette hypothèse s'applique à un contexte de charge de travail élevée, on devrait également s'attendre à une antériorisation de l'activité alpha et une augmentation de l'activité thêta frontomédiane pour une condition facile comme la condition homogène. Cependant, une amélioration de la performance des sujets témoins à la tâche homogène laisse penser qu'un effet de pratique aurait pu masquer cet effet. Des analyses plus approfondies, basées sur l'apparition de chaque stimulus (des analyses temps-fréquence) et non sur les données continues de chaque

condition, pourraient permettre de mieux comprendre cette absence de signature topographique de la fatigue.

La variabilité de la fréquence cardiaque

Les résultats ne permettent pas de confirmer les hypothèses selon lesquelles, d'une part, la VFC diminuerait davantage en fonction de la charge de travail chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale et, d'autre part, que ces derniers présenteraient une augmentation plus importante de l'activité du système nerveux sympathique par rapport au système nerveux parasympathique.

Faisant écho au modèle proposé par Thayer et al. (2009), une VFC élevée au repos, telle que mesurée par la puissance relative des hautes fréquences de la VFC, était positivement corrélée à la performance à une tâche recrutant les fonctions exécutives. Toutefois, contrairement à l'étude de Huang et al. (2018), ce sont les sujets avec un historique de commotion cérébrale qui présentaient les valeurs les plus élevées sur cette variable.

En comparant les données de la condition homogène de la seconde tâche Switch à celles de la première tâche Switch, une augmentation générale de la VFC au cours de l'expérimentation a été trouvée pour les deux groupes. La VFC à court terme (SD1), associée principalement au système nerveux parasympathique, et la VFC à long terme (SD2), associée au système nerveux sympathique, ont toutes deux augmenté au cours de l'expérimentation. L'augmentation conjointe de ces deux paramètres au cours de la tâche confirme l'utilité d'effectuer des analyses séparées des systèmes sympathique et parasympathique plutôt que seulement basées sur un ratio (Shaffer et Ginsberg, 2017).

Pour les deux temps de mesure, les sujets témoins présentaient, globalement, un ratio SD2/SD1 plus élevé que les sujets avec un historique de commotion cérébrale, mais cette différence n'est spécifiquement attribuable à aucun des deux paramètres du ratio.

Ainsi, les sujets avec un historique de commotion cérébrale sont ceux qui avaient globalement un ratio moins élevé de la VFC à long terme sur la VFC à court terme, ainsi qu'une puissance relative des hautes fréquences plus élevée, ce qui suggère une activité parasympathique plus importante par rapport à l'activité sympathique.

L'hétérogénéité de la population avec un historique de commotion cérébrale

Certains résultats mentionnés plus haut semblent indiquer que les résultats du groupe HC sont plus hétérogènes que ceux du groupe témoin. La présente étude n'est pas la première à trouver une distribution plus variable ou hétérogène chez cette population. McGrath et al. (2013) ont montré qu'une proportion importante d'athlètes ayant subi une commotion cérébrale sous-performaient à une tâche cognitive à la suite d'un exercice aérobic, alors qu'ils montraient une performance normale au repos. Avec un protocole semblable à celui de McGrath et la même tâche Switch que dans la présente étude, Sicard, Lortie, et al. (2018) ont montré qu'une certaine proportion d'athlètes commotionnés sous-performaient à la tâche seulement après un exercice aérobic de 20 minutes alors que d'autres sous-performaient avant et après l'exercice aérobic. Dans une autre étude menée par notre laboratoire (Sicard et al., 2019), encore une fois avec la tâche Switch, cette hétérogénéité s'est révélée chez des athlètes asymptomatiques et dont la dernière commotion cérébrale remontait à un minimum de 6 mois. Dans cette étude, 21% des athlètes sous-performaient à la tâche Switch à la suite d'un exercice aérobic de 20 minutes, comparativement à 3% des athlètes n'ayant jamais subi de commotion cérébrale. En somme, ces trois études suggèrent que parmi la population d'athlètes ayant un historique de commotion cérébrale et se déclarant asymptomatique, une minorité d'individus présenteraient des altérations significatives des capacités cognitives et que ces altérations peuvent être révélées par un test cognitif suffisamment complexe ou par un effort aérobic soutenu. Dans le cadre de la présente étude, cette hétérogénéité pourrait être révélée par une variabilité plus élevée de certains indices de performance et par une relation particulière entre la performance et trois mesures auto-rapportées.

La découverte d'une relation entre la fatigue mentale, la somnolence, les symptômes de dépression et la performance à la seconde tâche Switch chez les participants ayant un historique de commotion cérébrale indique que certains individus semblent plus affectés que d'autres par un effort cognitif soutenu et qu'il est possible de les catégoriser à l'aide

de ces trois variables. À cela, il faut ajouter que même si les items de la sous-échelle de fatigue mentale de l'IMF-20 portent tous sur la capacité à se concentrer, nous n'avons pas trouvé de relation linéaire avec les scores de la sous-échelle d'inattention du CAARS. Pour les symptômes de dépression, seulement le facteur Somatif-Affectif corrélait significativement avec la performance. De plus, ce facteur corrélait fortement avec les scores de fatigue générale, mais pas avec les scores de fatigue mentale, ce qui suggère qu'ils n'appartiennent pas exactement au même construit. Cette relation entre le facteur Sommatif-Affectif et la fatigue générale a également été rapportée auprès d'une population souffrant du syndrome de fatigue chronique (Brown, Kaplan et Jason, 2012) et appuie l'idée selon laquelle il y a un chevauchement entre les items des questionnaires de fatigue et de symptômes de dépression (des items portant sur la qualité du sommeil, la motivation, la fatigue et les difficultés à se concentrer composent le facteur Sommatif-Affectif). Cependant, d'autres études, l'une menée auprès de victimes de TCC légers et l'autre auprès de victimes de TCC légers à sévères, ont montré que même en utilisant un questionnaire de symptômes de dépression contrôlant en partie pour le chevauchement des symptômes somatiques associés à la fatigue, la fatigue quotidienne permettait quand même de prédire les symptômes de dépression auto-rapportés (Norrie et al., 2010; Schönberger, Herrberg et Ponsford, 2014). Pour ce qui est de la relation entre la somnolence et la fatigue mentale, puisque les deux mesures corrélaient avec la performance à la suite d'un effort cognitif soutenu, l'hypothèse la plus simple serait que la fatigue mentale cause la somnolence et agisse comme variable tierce entre elle et la performance. Cette idée est appuyée en partie par la littérature. En plus de tester la relation entre la fatigue et les symptômes de dépression, Schönberger et al. (2014) ont montré que la fatigue subjective quotidienne mesurée à la suite d'un trauma léger à sévère permettait aussi de prédire les scores de somnolence 6 mois plus tard. Toutefois, les scores de somnolence ne permettaient pas de prédire les scores de fatigue 6 mois plus tard. Cependant, il se pourrait aussi que la somnolence soit relativement indépendante de la fatigue mentale et qu'elle ne fasse que coïncider avec elle, ou qu'une somnolence accrue fasse en sorte que les sujets rapportent davantage de problèmes de concentration associés à la fatigue mentale.

L'effet potentiel des commotions cérébrales sur la sensibilité à l'effort cognitif

Les relations entre la fatigabilité de performance, la fatigue mentale quotidienne, la somnolence et les symptômes de dépression n'ont pas été trouvées chez les sujets témoins, qui rapportaient pourtant une diminution de la performance et des scores comparables sur ces trois questionnaires. Pour les sujets témoins, ce sont plutôt les scores de fatigue générale quotidienne qui corrôlaient négativement avec leur performance, mais seulement lors de la première tâche Switch. Ainsi, il convient de se demander si, toute chose étant égale par ailleurs, le fait d'avoir un historique de commotion cérébrale n'impacterait pas à long terme certains individus en les rendant plus sensibles à l'effort cognitif et ne diminuerait pas leur capacité à soutenir un effort, ce qui au quotidien se traduirait par une fatigue cognitive accrue. Un tel effet pourrait expliquer pourquoi cette relation post-effort ne se retrouverait pas chez des personnes sans historique de commotion cérébrale, pour lesquelles une meilleure capacité à maintenir un effort et à compenser l'état de fatigue agirait comme variable confondante. Une corrélation n'étant pas indicatrice de causalité, le sens de cette relation demeure pour le moins incertain : la fatigue mentale déjà ressentie au moment de participer à l'expérimentation pourrait tout autant causer cet effet de fatigabilité de performance plutôt que l'inverse. Des études ultérieures pourraient tenter de répliquer ces résultats et d'en révéler davantage sur les mécanismes sous-jacents de cette relation particulière.

Advenant le cas où cette relation trouvée chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale est avérée, elle pourrait être causée par différents mécanismes. D'après certains chercheurs, il existe un lien étroit entre fatigue et motivation (Boksem et Tops, 2008), et la sensation de fatigue, mais aussi la performance, pourraient être le produit d'un calcul coût-bénéfice. Cette fatigue pourrait théoriquement être causée par des dommages directs aux structures impliquées dans ce calcul motivationnel, comme le cortex préfrontal ventromédian dans le cas de lésions cérébrales traumatiques pénétrantes (Pardini, Krueger, Raymont et Grafman, 2010).

Toutefois, probablement en raison de la nature plus diffuse des dommages causés par les commotions cérébrales, cette relation entre la fatigue mentale et un calcul motivationnel est plus difficile à déterminer chez cette population. Schönberger et al. (2016) ont montré, chez des victimes de TCC légers à sévères, que la sensation de fatigue quotidienne n'était pas associée à des lésions particulières, mais que la fatigabilité de performance était associée à des lésions de la matière grise des cortex frontal et temporal droit, ainsi que par le volume total des lésions à la matière blanche. Les auteurs en ont conclu qu'une connectivité diminuée dans l'ensemble du cerveau pourrait mener à un épuisement plus rapide si les sujets doivent faire un effort supplémentaire pour accomplir performer correctement. La fatigabilité serait donc provoquée par un mécanisme plus étendu comme une compensation cognitive, comme proposé par van Zomeren (1984), et qui aurait pour effet de préserver la performance cognitive à court ou moyen terme, mais de fatiguer les sujets à plus long terme (Kohl et al., 2009; Liu et al., 2016; McAllister et al., 2001; Nordin et al., 2016; Ziino et Ponsford, 2006b).

Enfin, une autre théorie souligne que la fatigue générale ou mentale est un symptôme commun à plusieurs maladies neurodégénératives qui impliquent une neuro-inflammation et que cette dernière aurait pour effet d'altérer la capacité de recapture du glutamate par les astrocytes ainsi que l'approvisionnement en glucose et en substrats métaboliques (Rönnbäck et Hansson, 2004). De plus, le glutamate non recapturé causerait un gonflement des astrocytes et augmenterait l'excitabilité des circuits neuronaux voisins tout en diminuant leur efficacité énergétique, ce qui mènerait à un épuisement plus rapide des ressources énergétiques. D'après la description de la cascade neuro-métabolique des commotions cérébrales par Giza et Hovda (2014), basée sur des modèles animaux mais de plus en plus corroborée chez l'humain (Barkhoudarian, Hovda et Giza, 2016), le glutamate est déjà impliqué lors de la phase aigüe d'une commotion cérébrale. Les auteurs rapportent qu'au moment de l'impact, une libération excessive de glutamate et de flux ioniques perturbent l'homéostasie cellulaire, ce qui cause une hyperglycolyse. Cependant, l'afflux sanguin au cerveau, insuffisant pour répondre aux soudaines demandes énergétiques, provoquerait un état d'hypoglycolyse pouvant durer plusieurs jours et notamment associé à des problèmes d'apprentissage spatial chez les animaux. Il a d'ailleurs été montré qu'un mois après l'incident, les athlètes qui prenaient le plus de temps à récupérer d'une

commotion montraient encore des signes de flux sanguin diminué au cerveau, et que ceux avec le flux sanguin le plus bas avaient aussi des symptômes de dépression et d'anxiété plus élevés (Meier, Bellgowan, et al., 2015), ce qui suggère que cet état d'hypoglycolyse pourrait perdurer. Or, les astrocytes jouent un rôle important dans l'approvisionnement énergétique, constituant la principale source de glycogène du cerveau. Un tel état pourrait, par manque d'efficacité à long terme dans l'approvisionnement énergétique, dépleter les réserves de glycogène des astrocytes. Le lactate, un sous-produit du glycogène astrocytaire, servirait entre autres de source d'énergie pour les neurones et aurait un effet protecteur sur ces derniers, les empêchant d'épuiser leurs réserves d'ATP. Pour appuyer cette idée, Matsui et al. (2017), en soumettant des rats à un protocole d'effort physique prolongé, ont montré que le fait de bloquer le transport du lactate ou la production de glycogène avait pour effet de diminuer les niveaux d'ATP dans l'hippocampe et d'accélérer l'épuisement des animaux. Ainsi, une perturbation du flux sanguin cérébral ou du fonctionnement des astrocytes pourraient théoriquement expliquer une diminution de la performance cognitive non seulement à la suite d'un effort cognitif, mais également d'un effort physique. Dans un premier temps, des études subséquentes pourraient explorer l'hypothèse selon laquelle les athlètes ayant un historique de commotion cérébrale et rapportant des scores de fatigue mentale, de somnolence et des symptômes de dépression plus élevés, seraient moins performants à une tâche cognitive complexe à la suite d'un effort mental ainsi que d'un effort physique soutenu. Dans un second temps, il serait intéressant de savoir si ces deux phénomènes d'épuisement sont produits par un mécanisme commun, comme un mécanisme compensatoire, un dérèglement du fonctionnement des astrocytes provoqué par une neuro-inflammation chronique ou une crise énergétique provoquée par un flux sanguin cérébral réduit.

Analyses exploratoires

Raisonnement et méthode

Comme le groupe composé de sujets avec un historique de commotion cérébrale présentait une variabilité intra-individuelle et inter-individuelle élevées au niveau du coût local et que la fatigue mentale corrélait fortement avec un indice de performance, nous nous sommes

permis de mener des analyses exploratoires afin d'étudier plus en profondeur l'hypothèse selon laquelle un sous-groupe de sujets avec un historique de commotion pourrait sous-performer. Pour cette raison, le groupe a été divisé en deux afin de voir si un profil de sous-groupe peut être dressé pour inspirer de futures études. Cette façon de procéder comporte bien sûr des limites, comme une taille d'échantillon très faible (6 participants dans chaque sous-groupe), un critère de division choisi arbitrairement et le fait que les tests sont menés sur des données déjà analysées.

Ainsi, puisque le coût global de précision de la seconde tâche Switch présentait une corrélation avec la puissance relative des hautes fréquences de la VFC, que les sujets ne montraient pas un effet du temps sur la tâche à cette variable et que la fatigue mentale rapportée corrélait fortement avec cette variable, cette variable fut utilisée pour diviser le groupe. Les scores de fatigue mentale n'ont pas été utilisés car ils sont de type discret et se prêtent moins bien à une division égale en fonction de la médiane (deux participants avaient un score équivalent à la médiane).

En divisant le groupe HC par rapport à son coût global de précision médian (3.61) de la seconde tâche Switch, deux sous-groupes ont été créés : le groupe « *Performant* », dont les scores étaient inférieurs à la médiane, et le groupe « *Non-performant* », dont les scores étaient supérieurs à la médiane.

Les deux groupes ont ensuite été comparés par rapport aux données démographiques, aux questionnaires auto-rapportés, à leur performance à l'épreuve de raisonnement, à leur réponse subjective à un effort cognitif soutenu, à leur performance lors de la première tâche Switch, à la variabilité de leur fréquence cardiaque et à l'activité spectrale captée par EEG.

Comme pour la comparaison entre le groupe HC et le groupe témoin, les hypothèses étaient que le groupe « *Non-performant* » présenterait des scores plus élevés aux questionnaires auto-rapportés, des scores plus élevés aux échelles de Likert post-effort, une performance différente lors de la deuxième tâche Switch, une VFC plus basse et une activité spectrale thêta et alpha supérieure lors de la deuxième tâche Switch. Pour toutes ces variables, les comparaisons ont donc été effectuées au moyen de tests T unilatéraux et, pour les échelles de Likert, de tests U de Mann-Whitney. À noter qu'en dépit de la petite taille d'échantillon,

les tests T sont utilisés dans ce cas-ci pour leur robustesse à la non-normalité (Posten, 1984) et pour leur puissance statistique généralement acceptable et préférable aux tests non-paramétriques même en contexte de très petits échantillons ($n \leq 5$) (De Winter, 2013). Cependant, De Winter (2013) prévient que le risque d'erreurs de type II n'est acceptable que si la taille d'effet est élevée ($r = .50$ en sciences comportementales (Cohen, 2013)).

Résultats

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les deux sous-groupes pour le nombre total de commotions, le temps depuis la dernière commotion, la durée des symptômes de la dernière commotion, le nombre de symptômes (et leur gravité) de la dernière commotion, l'âge, le nombre d'années d'étude et le nombre d'années de pratique du sport ($p > .05$).

Une différence significative a été trouvée, entre les deux sous-groupes, pour les scores au questionnaire d'insomnie, le groupe « *Non-performant* » rapportant des scores plus élevés ($M = 8.83$; $\acute{E}-T = 4.62$) que le groupe « *Performant* » ($M = 4.00$; $\acute{E}-T = 2.28$), $t(10) = -2.30$, $p = .027$, $r = .59$.

Une différence significative a été trouvée pour les scores de motivation post-effort, le sous-groupe « *Non-performant* » étant moins motivé ($M = 5.17$; $\acute{E}-T = 1.84$) que le sous-groupe « *Performant* » ($M = 7.17$; $\acute{E}-T = .753$), $U = 5.5$, $z = -2.09$, $p = .041$, $r = -.60$.

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les sous-groupes pour leur performance à l'épreuve de raisonnement.

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les sous-groupes pour les différents coûts de précision ou de temps de réponse lors de la première tâche Switch. Une différence significative a été trouvée entre les groupes sur la variable SIGMA de la condition homogène lors de la passation de la première tâche Switch, le sous-groupe « *Non-performant* » montrant des valeurs plus élevées ($M = 46.93$; $\acute{E}-T = 17.33$) que le sous-groupe « *Performant* » ($M = 31.51$, $\acute{E}-T = 6.62$), $t(10) = -2.04$, $p = .035$, $r = .54$. Une différence significative a également été trouvée pour la variable COÛT LOCAL SIGMA lors de la seconde tâche Switch, le sous-groupe « *Non-performant* » montrant des valeurs

plus élevées ($M = 128.94$; $\text{É-T} = 97.44$) que le sous-groupe « *Performant* » ($M = 19.2$; $\text{É-T} = 42.16$), $t(10) = -2.53$, $p = .015$, $r = .63$.

En accord avec la relation trouvée précédemment entre le coût global de précision post-effort et la puissance relative des hautes fréquences de la VFC, le sous-groupe « *Non-performant* » présente une puissance relative des hautes fréquence moins élevée ($M = 32.7$; $\text{É-T} = 15.01$) que le sous-groupe « *Performant* » ($M = 52.45$, $\text{É-T} = 16.56$), $t(10) = 2.17$, $p = .028$, $r = .56$. Lors de la condition hétérogène de la seconde tâche Switch, le groupe « *Non-performant* » a également montré un ratio SD2/SD1 plus élevé ($M = 1.68$; $\text{É-T} = .13$) que le sous-groupe « *Performant* » ($M = 1.45$; $\text{É-T} = .21$), $t(10) = -2.33$, $p = .021$, $r = .59$.

Les sujets du groupe « *Non-performant* » ont présenté des valeurs de puissance spectrale significativement plus élevées pour toutes les conditions des deux tâches Switch. Par soucis de concision, seulement les moyennes et les écart-types des variables montrant des différences significatives sont affichés dans les tableaux qui suivent.

	Groupe				t	p	r
	Performant		Non-performant				
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type			
Alpha 1 (Occipitale)	37.98	1.84	40.97	3.49	-1.85	0.047	0.50

TABLEAU 4

Moyennes et écart-types, pour la période de repos, de la puissance spectrale de l'activité alpha à la région occipitale et montrant une différence significative entre les sous-groupes « *Performant* » et « *Non-performant* ».

	Groupe				t	p	r
	Performant		Non-performant				
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type			
Thêta (Frontale)	45.53	1.93	49.26	3.80	-2.15	0.033	0.56
Thêta (Centrale)	43.07	2.54	46.77	2.11	-2.74	0.010	0.65
Alpha 1 (Centrale)	40.97	3.88	46.36	5.37	-1.99	0.037	0.53
Alpha 1 (Pariétale)	40.07	3.60	45.98	5.29	-2.26	0.024	0.58

TABLEAU 5

Moyennes et écart-types, pour la condition homogène de la première tâche Switch, de la puissance spectrale de l'activité thêta et alpha aux régions montrant une différence significative entre les sous-groupes « *Performant* » et « *Non-performant* ».

	Groupe				t	p	r
	Performant		Non-performant				
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type			
Alpha 1 (Centrale)	42.66	2.70	46.76	3.86	-2.14	0.029	0.56
Alpha 2 (Centrale)	41.40	3.00	43.86	1.33	-1.83	0.048	0.50

TABLEAU 6

Moyennes et écart-types, pour la condition hétérogène de la première tâche Switch, de la puissance spectrale de l'activité alpha aux régions montrant une différence significative entre les sous-groupes « *Performant* » et « *Non-performant* ».

	Groupe				t	p	r
	Performant		Non-performant				
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type			
Thêta (Frontale)	46.44	1.52	49.42	3.43	-1.95	0.040	0.52
Thêta (Centrale)	43.53	2.38	46.76	3.29	-1.95	0.040	0.52
Alpha 1 (Centrale)	41.44	3.78	46.41	5.31	-1.87	0.046	0.51
Alpha 1 (Pariétale)	39.42	4.01	45.81	5.37	-2.34	0.021	0.59

TABLEAU 7

Moyennes et écart-types, pour la condition homogène de la seconde tâche Switch, de la puissance spectrale de l'activité thêta et alpha aux régions montrant une différence significative entre les sous-groupes « *Performant* » et « *Non-performant* ».

	Groupe				t	p	r
	Performant		Non-performant				
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type			
Thêta (Frontale)	47.17	1.99	50.27	3.34	-1.95	0.040	0.52
Thêta (Centrale)	44.90	1.32	47.74	2.78	-2.26	0.024	0.58
Alpha 1 (Centrale)	41.86	2.38	46.36	4.58	-2.14	0.029	0.56
Alpha 1 (Pariétale)	40.29	2.35	45.63	4.65	-2.51	0.015	0.62
Alpha 2 (Pariétale)	40.54	3.97	44.09	2.57	-1.84	0.048	0.50

TABLEAU 8

Moyennes et écart-types, pour la condition hétérogène de la seconde tâche Switch, de la puissance spectrale de l'activité thêta et alpha aux régions montrant une différence significative entre les sous-groupes « *Performant* » et « *Non-performant* ».

Un profil de sous-groupe

Globalement, les analyses exploratoires effectuées suggèrent qu'un sous-groupe de sujets avec un historique de commotion cérébrale performait moins bien à la suite d'un effort cognitif soutenu. Ils rapportaient une fatigue mentale quotidienne plus élevée, des symptômes de somnolence et des symptômes de dépression plus élevés et ils présentaient une motivation moindre, une variabilité intra-individuelle des temps de réponse plus élevée à la tâche Switch avant et après un effort cognitif ainsi que ce qui pourrait être considéré comme des signes de compensation cognitive et un moins bon équilibre du système nerveux autonome. Ce profil suggère que chez un sous-groupe d'athlètes, un effort cognitif accru pour réaliser une même tâche pourrait mener à un épuisement accéléré des ressources cognitives et à une diminution de la performance.

Il faut cependant souligner qu'il y a d'importantes limites à la présente analyse exploratoire qui minimise grandement l'interprétation et la portée des résultats. Premièrement, la très petite taille des sous-groupes (6 participants par sous-groupe) formés pour les analyses exploratoires, qui peuvent mener à une sur-représentation de scores extrêmes dans l'échantillon et augmenter les chances d'erreurs de type 1. Il faut noter également que les tests statistiques ont été menés sur des données déjà analysées sans utiliser de correction pour comparaisons multiples en raison de la nature exploratoire de l'exercice.

Les résultats des analyses concordent avec plusieurs des théories mentionnées précédemment et qui traitent des effets ou des causes possibles de la fatigue cognitive. Ils concordent aussi avec des résultats déjà obtenus auprès de sujets avec un historique de commotion cérébrale. Tout d'abord, ce sous-groupe rapportait des scores plus élevés d'insomnie. Ils présentaient, également, des niveaux de motivation plus bas à la suite d'un effort cognitif soutenu, ce qui fait écho à la théorie de Boksem et Tops (2008) sur le lien entre un calcul motivationnel et la fatigue. Ensuite, s'ils performaient de façon similaire lors de la première tâche Switch, ils montraient tout de même une variabilité intra-individuelle plus élevée des temps de réponse lors de la condition homogène. De plus, ils présentaient une variabilité intra-individuelle des temps de réponse plus élevée à la condition hétérogène pour la seconde tâche Switch, ce qui concorde avec l'hypothèse selon

laquelle une variabilité intra-individuelle plus élevée serait associée à des niveaux de performance plus bas chez cette population (Hill et al., 2013; Rabinowitz et Arnett, 2013).

Alors que les sujets du sous-groupe « *Non-performant* » avaient des scores de performance plutôt similaires à ceux du groupe « *Performant* » lors de la première tâche Switch, ils présentaient cependant une puissance spectrale de la bande thêta aux régions frontale et centrale et de la bande alpha 1 aux régions centrale et pariétale supérieure lors de la complétion de la condition homogène. De plus, ces différences ont perduré pour la condition homogène de la seconde tâche Switch. Lors de la condition hétérogène de la première tâche Switch, le sous-groupe « *Non-performant* » a également montré une puissance spectrale supérieure des bandes alpha 1 et alpha 2 sur la région centrale du scalp. Pour la condition hétérogène de la seconde tâche Switch, le sous-groupe « *Non-performant* » a montré une puissance spectrale supérieure de la bande thêta sur les régions frontale et centrale, de la bande alpha 1 sur les régions centrale et pariétale, et de la bande alpha 2 sur la région pariétale. Une activité thêta frontale accrue étant normalement associée à une charge cognitive plus importante (Cooper et al., 2019; Sauseng et al., 2006), un tel pattern lors de la première tâche Switch pourrait être interprété comme un indice de compensation cognitive de la part du groupe « *Non-performant* ». Curieusement, le sous-groupe « *Non-performant* » a montré une puissance supérieure de l'activité alpha 2 lors des deux conditions hétérogènes, résultat qui est en apparente contradiction avec l'hypothèse formulée précédemment pour expliquer une différence sur cette bande avec les sujets témoins. Notons cependant que l'activité de la bande alpha 2 obéirait également, en situation d'augmentation de la charge cognitive, à une fonction curvilinéaire qui la ferait diminuer graduellement, puis augmenter lorsque diminue la probabilité de répondre correctement (Fairclough et Ewing, 2017). Le fait que cette différence entre les sous-groupes ne soit significative qu'en contexte de contrôle cognitif accru (condition hétérogène) pourrait donc être un indice de saturation de la charge cognitive. L'activité alpha 1 plus élevée aux régions centrale et pariétale, quant à elle, pourrait indiquer une moins bonne capacité à traiter l'information de façon efficiente, une synchronisation de l'activité alpha plus importante chez cette population étant associée à une composante P3 moins ample et potentiellement à des lésions de la matière blanche (Guay et al., 2018). Elle pourrait, également, indiquer un état de fatigue déjà existant au moment de commencer la

tâche (Barwick et al., 2012; Gevins et al., 1997; Rosipal et al., 2013; Trejo, 2011; Wascher et al., 2014; Zaidel et al., 2013), les sujets du sous-groupe « *Non-performant* » montrant d'ailleurs une puissance de l'activité spectrale de la bande alpha plus importante sur la région occipitale du scalp lors de la période de repos, ce qui indique un état de relaxation ou de fatigue plus important au moment de commencer l'expérimentation.

Les sujets du sous-groupe « *Non-performant* » présentaient une VFC plus faible au repos ainsi qu'un ratio de la VFC à long terme sur la VFC à court terme plus élevé lors de la condition hétérogène de la seconde tâche Switch, suggérant qu'une activité sympathique accrue par rapport au système parasympathique pourrait être associée à la fatigue mentale et à la performance.

Limites et faisabilité

Parmi les limites de la présente étude, notons d'abord la taille d'échantillon. Étant donnée la nature préliminaire de cette étude, aucun calcul visant à déterminer la taille d'échantillon appropriée n'a été effectué. La probabilité d'obtenir des scores extrêmes est plus élevée avec une petite taille d'échantillon, ce qui peut évidemment biaiser les résultats. Par exemple, dans la présente étude, les sujets témoins présentent une puissance relative des hautes fréquences de la VFC plus faible que les sujets avec un historique de commotion cérébrale, alors que cette variable permet de prédire le coût global de précision après l'épreuve de raisonnement. La relation entre les deux variables semble s'exprimer différemment pour chacun des groupes, mais la taille d'échantillon trop faible ne nous a pas permis de comparer les pentes des deux relations. Il est donc difficile de dire si la puissance relative plus élevée chez les sujets avec un historique de commotion cérébrale est elle-même une conséquence des commotions ou si, sur le petit nombre de participants recrutés, ces sujets présentent par hasard des valeurs plus élevées. Dans le premier cas, cela signifierait sans doute une atténuation de la pente de la relation entre la puissance relative des hautes fréquences de la VFC et la performance, car les participants de ce groupe auraient des valeurs plus élevées pour une même performance. Une taille d'échantillon plus grande permettrait d'obtenir plus de variabilité dans l'étendu des valeurs des deux groupes, et ultimement, de confirmer ce lien.

Combiné à la petite taille d'échantillon, le nombre élevé de tests statistiques effectués est associé à un risque élevé d'inflation de l'erreur de type I, ce qui signifie qu'il est possible que certains des effets mesurés dans la présente étude soient en réalité non significatifs. Comme les méthodes de correction pour les comparaisons multiples comme celle de Bonferroni ne tiennent souvent compte que de l'hypothèse nulle (Perneger, 1998) et ne prennent donc pas en considération les covariations entre les scores des différents questionnaires, les sous-échelles, la performance et les données physiologiques, ces corrections ont été limitées aux tests post-hoc. Également pour cette raison, les valeurs p exactes ainsi que les tailles d'effets sont partagées pour l'ensemble des tests effectués et la réplication littérale ou de construit par d'autres équipes de recherche est fortement encouragée.

Ensuite, même si la présente étude a permis d'identifier des différences dans la façon dont les deux groupes ont répondu à la tâche Switch ainsi que de supporter l'idée selon laquelle la population à l'étude est hétérogène et que certains individus pourraient être plus sujets à la fatigue, les critères de faisabilité mentionnés dans la section « Objectifs » n'ont pas été exactement rencontrés. Les athlètes avec un historique de commotion cérébrale n'ont pas rapporté davantage de fatigue et n'ont pas montré de signes d'une fatigabilité plus importante, que ce soit au niveau des scores auto-rapportés, au niveau comportemental ou au niveau physiologique. Les limites mentionnées plus bas pourraient expliquer ce manque de résultats et les modifications suggérées pourraient être appliquées dans des études ultérieures afin de maximiser les chances de mesurer des différences entre les groupes.

Même si les sujets ont montré, en général, des signes de fatigabilité au cours de l'expérimentation, la durée d'administration de l'épreuve de raisonnement pourrait être augmentée ou une épreuve plus difficile, et dont la validité serait plus avérée, pourrait être utilisée lors d'études ultérieures. Une telle modification pourrait accroître l'effet du temps sur la tâche, que ce soit au niveau comportemental, physiologique ou des scores de fatigue, d'effort et de motivation auto-rapportés.

Une limite importante à mentionner est que l'effet de pratique n'a pas été suffisamment contrôlé dans la présente étude. Comme il a été mentionné précédemment, même si l'objectif premier de l'étude, qui était de fatiguer les participants, a été atteint, le manque de différences temporelles claires au niveau de l'activité spectrale pourrait être dû à cet effet de pratique. Dans une prochaine étude, les participants pourraient être entraînés au cours d'un premier rendez-vous jusqu'à ce que leur performance plafonne, puis participer à l'expérimentation lors d'un second rendez-vous.

La tâche Switch utilisée dans cette étude était de type perceptuel et à contrôle réactif, et comportait des stimuli congruents et incongruents. Même si les résultats montrent que la tâche génère bel et bien un coût de congruence et des coûts de commutation, une prochaine étude pourrait inclure une tâche avec certains des éléments mentionnés dans l'introduction. Par exemple, compte tenu du fait que les régions préfrontales sont différemment recrutées en fonction du type de tâche, le recours au changement de réponse et au changement

contextuel pourrait provoquer des résultats différents et aider à mieux cerner le mécanisme de la blessure à long terme. Il serait aussi pertinent d'utiliser un paradigme de *task-switching* à trois tâches pour mesurer le phénomène d'inhibition rétroactive, ou de comparer au sein d'un même paradigme le contrôle proactif et le contrôle réactif en utilisant des indices décisionnels qui précèdent la présentation de chaque stimulus.

En ce qui concerne les données EEG, comme l'hypothèse initiale portait sur des changements généraux et évidents dans la puissance spectrale, une transformation de Fourier a été appliquée sur les données continues de chaque session, mais aucune analyse plus spécifique n'a été effectuée. L'analyse pourrait être étoffée en utilisant les composantes indépendantes ou en effectuant des transformations temps-fréquence afin de comparer l'activité des participants pour chaque type de stimulus. Tel que mentionné dans l'introduction, l'activité du cortex préfrontal est davantage associée à l'interférence qu'à la performance en contexte de contrôle réactif. Analyser les réactions des groupes aux différents types de stimuli pourrait permettre de les comparer plus précisément qu'en utilisant les données continues de chaque session.

Finalement, les données relatives aux questionnaires auto-rapportés et aux échelles de Likert pourraient être sujettes à un biais de désirabilité sociale. Même si la confidentialité était respectée, que la participation à l'étude était sous base volontaire et que, pour les athlètes, l'étude n'avait aucun impact sur leur participation à des activités sportives car ils étaient tous déjà retournés au jeu depuis leur commotion, les athlètes ont tendance à sous-rapporter leurs symptômes post-commotionnels (Meier, Brummel, et al., 2015). Les échelles de type Likert, qui n'ont été utilisées que dans le contexte de la présente étude et en absence d'alternative dont la validité serait plus avérée, ne sont composées que d'un item par « dimension » mesurée (fatigue, effort, motivation) et l'étendu des réponses est restreint. Des échelles avec davantage d'items par dimension, la traduction d'outils déjà existants ou le développement d'un outil spécifique pour mesurer la fatigue situationnelle chez cette population seraient des améliorations notables pour des études ultérieures.

Conclusion

Les résultats obtenus dans la présente étude indiquent que l'effort cognitif soutenu des participants a bel et bien généré une fatigue subjective et une fatigabilité de performance objectivement mesurable chez tous les sujets. Si dans l'ensemble les résultats n'appuient pas l'hypothèse initiale selon laquelle les sujets avec un historique de commotion cérébrale rapporteraient plus de fatigue quotidienne et montreraient une fatigabilité de performance ou physiologique plus importante, les deux groupes ont montré des différences notables dans leur façon de répondre à la tâche, ce qui a révélé l'absence d'un effet de pratique à la condition homogène pour les sujets avec un historique de commotion cérébrale et une variabilité intra-individuelle et inter-individuelle importante chez ce groupe. De plus, ceux qui rapportaient des signes et symptômes plus importants de fatigue cognitive quotidienne, de somnolence et des symptômes de dépression avaient aussi une moins bonne précision à la tâche après un effort cognitif soutenu, et les sujets correspondant le plus à ce profil présentaient des différences notables, allant pour la majeure partie dans le sens de nos hypothèses initiales, par rapport au sous-groupe représentant le moins ce profil. Ainsi, même si les critères de faisabilité d'une étude ultérieure n'ont pas été clairement remplis, ces résultats suggèrent que de futures études, avec un échantillon plus grand et un contrôle plus adéquat de l'effet de pratique, devraient quand même permettre d'étudier avec plus de précision le lien entre les mesures auto-rapportées, les mesures physiologiques et la fatigabilité de performance. L'utilisation de questionnaires auto-rapportés sur la fatigue, les symptômes de dépression et la somnolence, mais aussi le recours à des mesures physiologiques comme la variabilité de la fréquence cardiaque, pourraient permettre à l'avenir de mieux cibler les individus présentant des altérations cognitives à long terme à la suite d'une commotion cérébrale. En ce qui concerne les retombées cliniques, cette étude permet de souligner l'hétérogénéité de cette population, mais aussi l'importance de tenir compte de la variation de la performance chez les victimes de commotion cérébrale. Le recours à des outils de mesure ou à un questionnement approfondi portant sur la fatigue subjective quotidienne et les symptômes de somnolence, à des tests informatisés recrutant les fonctions exécutives et à une évaluation visant à tester la fatigabilité de performance des clients, pourrait éventuellement permettre de mieux comprendre certaines plaintes qui

seraient plutôt causées par la fatigue et, ainsi, de développer de meilleures stratégies d'adaptation pour cette population.

Références

- Ackerman, P. L. et Kanfer, R. (2009). Test length and cognitive fatigue: An empirical examination of effects on performance and test-taker reactions. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 15(2), 163-181. doi: 10.1037/a0015719
- Ashman, T. A., Cantor, J. B., Gordon, W. A., Spielman, L., Egan, M., Ginsberg, A., . . . Flanagan, S. (2008). Objective measurement of fatigue following traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 23(1), 33-40. doi: 10.1097/01.htr.0000308719.70288.22
- Azouvi, P., Couillet, J., Leclercq, M., Martin, Y., Asloun, S. et Rousseaux, M. (2004). Divided attention and mental effort after severe traumatic brain injury. *Neuropsychologia*, 42(9), 1260-1268. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2004.01.001
- Baillargeon, A., Lassonde, M., Leclerc, S. et Ellemberg, D. (2012). Neuropsychological and neurophysiological assessment of sport concussion in children, adolescents and adults. *Brain Inj*, 26(3), 211-220. doi: 10.3109/02699052.2012.654590
- Barkhoudarian, G., Hovda, D. A. et Giza, C. C. (2016). The molecular pathophysiology of concussive brain injury—an update. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, 27(2), 373-393.
- Barlow, S. E., Medrano, P., Seichepine, D. R. et Ross, R. S. (2018). Investigation of the changes in oscillatory power during task switching after mild traumatic brain injury. *Eur J Neurosci*, 48(12), 3498-3513. doi: 10.1111/ejn.14231
- Barwick, F., Arnett, P. et Slobounov, S. (2012). EEG correlates of fatigue during administration of a neuropsychological test battery. *Clin Neurophysiol*, 123(2), 278-284. doi: 10.1016/j.clinph.2011.06.027
- Bastien, C. H., Vallieres, A. et Morin, C. M. (2001). Validation of the Insomnia Severity Index as an outcome measure for insomnia research. *Sleep Med*, 2(4), 297-307.
- Beaulieu-Bonneau, S., Fortier-Brochu, E., Ivers, H. et Morin, C. M. (2015). Attention following traumatic brain injury: Neuropsychological and driving simulator data, and association with sleep, sleepiness, and fatigue. *Neuropsychol Rehabil*, 1-23. doi: 10.1080/09602011.2015.1077145
- Beaulieu-Bonneau, S. et Morin, C. M. (2012). Sleepiness and fatigue following traumatic brain injury. *Sleep Med*, 13(6), 598-605. doi: 10.1016/j.sleep.2012.02.010
- Beck, A. T., Epstein, N., Brown, G. et Steer, R. A. (1988). An inventory for measuring clinical anxiety: psychometric properties. *Journal of consulting and clinical psychology*, 56(6), 893.
- Beck, A. T., Steer, R. A. et Brown, G. K. (1996). Beck depression inventory-II. *San Antonio*, 78(2), 490-498.
- Belmont, A., Agar, N. et Azouvi, P. (2009). Subjective fatigue, mental effort, and attention deficits after severe traumatic brain injury. *Neurorehabil Neural Repair*, 23(9), 939-944. doi: 10.1177/1545968309340327
- Belmont, A., Agar, N., Hugeron, C., Gallais, B. et Azouvi, P. (2006). Fatigue and traumatic brain injury. *Ann Readapt Med Phys*, 49(6), 283-288, 370-284. doi: 10.1016/j.annrmp.2006.04.017
- Bernstein, D. M. (2002a). Information processing difficulty long after self-reported concussion. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8(5), 673-682. doi: 10.1017/S1355617702801400

- Bernstein, D. M. (2002b). Information processing difficulty long after self-reported concussion. *J Int Neuropsychol Soc*, 8(5), 673-682. doi: 10.1017/s1355617702801400
- Bishop, S. A., Dech, R. T., Guzik, P. et Neary, J. P. (2018). Heart rate variability and implication for sport concussion. *Clin Physiol Funct Imaging*, 38(5), 733-742. doi: 10.1111/cpf.12487
- Boksem, M. A. et Tops, M. (2008). Mental fatigue: costs and benefits. *Brain Res Rev*, 59(1), 125-139. doi: 10.1016/j.brainresrev.2008.07.001
- Boksem, M. A. S., Meijman, T. F. et Lorist, M. M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: An ERP study. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 107-116. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011>
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc*, 14(5), 377-381.
- Borrigan, G., Slama, H., Bartolomei, M. et Peigneux, P. (2017). Cognitive fatigue: A Time-based Resource-sharing account. *Cortex*, 89, 71-84. doi: 10.1016/j.cortex.2017.01.023
- Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(2), 106-113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.010>
- Brown, M., Kaplan, C. et Jason, L. (2012). Factor analysis of the Beck Depression Inventory-II with patients with chronic fatigue syndrome. *Journal of health psychology*, 17(6), 799-808. doi: 10.1177/1359105311424470
- Brzezicka, A., Kaminski, J., Reed, C. M., Chung, J. M., Mamelak, A. N. et Rutishauser, U. (2019). Working Memory Load-related Theta Power Decreases in Dorsolateral Prefrontal Cortex Predict Individual Differences in Performance. *J Cogn Neurosci*, 31(9), 1290-1307. doi: 10.1162/jocn_a_01417
- Bushnik, T., Englander, J. et Wright, J. (2008). Patterns of fatigue and its correlates over the first 2 years after traumatic brain injury. *J Head Trauma Rehabil*, 23(1), 25-32. doi: 10.1097/01.HTR.0000308718.88214.bb
- Buyse, D. J., Reynolds, C. F., Monk, T. H., Berman, S. R. et Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry research*, 28(2), 193-213.
- Cantor, J. B., Gordon, W. et Gumber, S. (2013). What is post TBI fatigue? *NeuroRehabilitation*, 32(4), 875-883.
- Cavanagh, J. F. et Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(8), 414-421. doi: 10.1016/j.tics.2014.04.012
- Ciccone, A. B., Siedlik, J. A., Wecht, J. M., Deckert, J. A., Nguyen, N. D. et Weir, J. P. (2017). Reminder: RMSSD and SD1 are identical heart rate variability metrics. *Muscle Nerve*, 56(4), 674-678. doi: 10.1002/mus.25573
- Clayton, M. S., Yeung, N. et Cohen Kadosh, R. (2015). The roles of cortical oscillations in sustained attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(4), 188-195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.004>
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic press.
- Cooper, P. S., Karayanidis, F., McKewen, M., McLellan-Hall, S., Wong, A. S. W., Skippen, P. et Cavanagh, J. F. (2019). Frontal theta predicts specific cognitive control-induced behavioural changes beyond general reaction time slowing. *Neuroimage*, 189, 130-140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.022>
- Cooper, P. S., Wong, A. S., Fulham, W. R., Thienel, R., Mansfield, E., Michie, P. T. et Karayanidis, F. (2015). Theta frontoparietal connectivity associated with proactive and reactive cognitive control processes. *Neuroimage*, 108, 354-363. doi: 10.1016/j.neuroimage.2014.12.028

- Covassin, T., Savage, J. L., Bretzin, A. C. et Fox, M. E. (2018). Sex differences in sport-related concussion long-term outcomes. *Int J Psychophysiol*, 132(Pt A), 9-13. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2017.09.010
- da Costa, L., Robertson, A., Bethune, A., MacDonald, M. J., Shek, P. N., Taylor, M. J. et Pang, E. W. (2015). Delayed and disorganised brain activation detected with magnetoencephalography after mild traumatic brain injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 86(9), 1008. doi: 10.1136/jnnp-2014-308571
- De Winter, J. C. (2013). Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 18(1), 10.
- Delorme, A. et Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of neuroscience methods*, 134(1), 9-21.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annu Rev Psychol*, 64, 135-168. doi: 10.1146/annurev-psych-113011-143750
- Dittner, A. J., Wessely, S. C. et Brown, R. G. (2004). The assessment of fatigue: a practical guide for clinicians and researchers. *J Psychosom Res*, 56(2), 157-170. doi: 10.1016/s0022-3999(03)00371-4
- Dozois, D. J. A. et Covin, R. (2004). The Beck Depression Inventory-II (BDI-II), Beck Hopelessness Scale (BHS), and Beck Scale for Suicide Ideation (BSS). *Comprehensive handbook of psychological assessment*, 2(Personality assessment), 50-69.
- Dunkley, B. T., Da Costa, L., Bethune, A., Jetly, R., Pang, E. W., Taylor, M. J. et Doesburg, S. M. (2015). Low-frequency connectivity is associated with mild traumatic brain injury. *Neuroimage Clin*, 7, 611-621. doi: 10.1016/j.nicl.2015.02.020
- Dupuis, F., Johnston, K. M., Lavoie, M., Lepore, F. et Lassonde, M. (2000). Concussions in athletes produce brain dysfunction as revealed by event-related potentials. *Neuroreport*, 11(18), 4087-4092. doi: 10.1097/00001756-200012180-00035
- Erhardt, D., Epstein, J., Conners, C., Parker, J. et Sitarenios, G. (1999). Self-ratings of ADHD symptoms in adults II: Reliability, validity, and diagnostic sensitivity. *Journal of Attention Disorders*, 3(3), 153-158.
- Eschmann, K. C. J., Bader, R. et Mecklinger, A. (2018). Topographical differences of frontal-midline theta activity reflect functional differences in cognitive control abilities. *Brain and Cognition*, 123, 57-64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2018.02.002>
- Faber, L. G., Maurits, N. M. et Lorist, M. M. (2012). Mental Fatigue Affects Visual Selective Attention. *PloS one*, 7(10), e48073. doi: 10.1371/journal.pone.0048073
- Fairclough, S. H. et Ewing, K. (2017). The effect of task demand and incentive on neurophysiological and cardiovascular markers of effort. *International Journal of Psychophysiology*, 119, 58-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.01.007>
- Fairclough, S. H. et Venables, L. (2006). Prediction of subjective states from psychophysiology: A multivariate approach. *Biol Psychol*, 71(1), 100-110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.03.007>
- Fairclough, S. H., Venables, L. et Tattersall, A. (2005). The influence of task demand and learning on the psychophysiological response. *International Journal of Psychophysiology*, 56(2), 171-184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2004.11.003>
- Fillion, L., Gelinas, C., Simard, S., Savard, J. et Gagnon, P. (2003). Validation evidence for the French Canadian adaptation of the Multidimensional Fatigue Inventory as a measure of cancer-related fatigue. *Cancer Nurs*, 26(2), 143-154.

- Frey, J. N., Ruhnau, P. et Weisz, N. (2015). Not so different after all: The same oscillatory processes support different types of attention. *Brain Research*, 1626, 183-197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.02.017>
- Gevins, A., Smith, M. E., Leong, H., McEvoy, L., Whitfield, S., Du, R. et Rush, G. (1998). Monitoring Working Memory Load during Computer-Based Tasks with EEG Pattern Recognition Methods. *Human Factors*, 40(1), 79-91. doi: 10.1518/001872098779480578
- Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L. et Yu, D. (1997). High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cerebral Cortex*, 7(4), 374-385. doi: 10.1093/cercor/7.4.374
- Giza, C. C. et Hovda, D. A. (2014). The new neurometabolic cascade of concussion. *Neurosurgery*, 75 Suppl 4(0 4), S24-S33. doi: 10.1227/NEU.0000000000000505
- Gosselin, N., Lassonde, M., Petit, D., Leclerc, S., Mongrain, V., Collie, A. et Montplaisir, J. (2009). Sleep following sport-related concussions. *Sleep Med*, 10(1), 35-46. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2007.11.023>
- Guay, S., De Beaumont, L., Drisdelle, B. L., Lina, J. M. et Jolicoeur, P. (2018). Electrophysiological impact of multiple concussions in asymptomatic athletes: A re-analysis based on alpha activity during a visual-spatial attention task. *Neuropsychologia*, 108, 42-49. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.11.022
- Guskiewicz, K. M., Register-Mihalik, J., McCrory, P., McCrea, M., Johnston, K., Makdissi, M., . . . Meeuwisse, W. (2013). Evidence-based approach to revising the SCAT2: introducing the SCAT3. *British Journal of Sports Medicine*, 47(5), 289-293.
- Halterman, C. I., Langan, J., Drew, A., Rodriguez, E., Osternig, L. R., Chou, L. S. et van Donkelaar, P. (2006). Tracking the recovery of visuospatial attention deficits in mild traumatic brain injury. *Brain*, 129(Pt 3), 747-753. doi: 10.1093/brain/awh705
- Hancock, P. A. et Meshkati, N. (1988). *Human mental workload*. North-Holland Amsterdam.
- Hill, B. D., Rohling, M. L., Boettcher, A. C. et Meyers, J. E. (2013). Cognitive Intra-Individual Variability Has a Positive Association with Traumatic Brain Injury Severity and Suboptimal Effort. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 28(7), 640-648. doi: 10.1093/arclin/act045
- Huang, M., Frantz, J., Morales, G., Sabo, T., Davis, P. F., Davis, S. L., . . . Purkayastha, S. (2018). Reduced Resting and Increased Elevation of Heart Rate Variability With Cognitive Task Performance in Concussed Athletes. *J Head Trauma Rehabil*. doi: 10.1097/htr.0000000000000409
- Ishii, R., Canuet, L., Ishihara, T., Aoki, Y., Ikeda, S., Hata, M., . . . Takeda, M. (2014). Frontal midline theta rhythm and gamma power changes during focused attention on mental calculation: an MEG beamformer analysis. *Frontiers in human neuroscience*, 8(406). doi: 10.3389/fnhum.2014.00406
- Itthipuripat, S., Wessel, J. R. et Aron, A. R. (2013). Frontal theta is a signature of successful working memory manipulation. *Experimental Brain Research*, 224(2), 255-262. doi: 10.1007/s00221-012-3305-3
- Jensen, O. et Tesche, C. D. (2002). Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *Eur J Neurosci*, 15(8), 1395-1399.
- Johansson, B., Berglund, P. et Ronnback, L. (2009). Mental fatigue and impaired information processing after mild and moderate traumatic brain injury. *Brain Inj*, 23(13-14), 1027-1040. doi: 10.3109/02699050903421099
- Johns, M. W. (1991). A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *sleep*, 14(6), 540-545.

- Jost, K., Hennecke, V. et Koch, I. (2017). Task Dominance Determines Backward Inhibition in Task Switching. *Frontiers in Psychology*, 8(755). doi: 10.3389/fpsyg.2017.00755
- Kaminska, M., Jobin, V., Mayer, P., Amyot, R., Perraton-Brillon, M. et Bellemare, F. (2010). The Epworth Sleepiness Scale: self-administration versus administration by the physician, and validation of a French version. *Can Respir J*, 17(2), e27-34.
- Karr, J. E., Garcia-Barrera, M. A. et Areshenkoff, C. N. (2014). Executive functions and intraindividual variability following concussion. *J Clin Exp Neuropsychol*, 36(1), 15-31. doi: 10.1080/13803395.2013.863833
- Kashluba, S., Paniak, C., Blake, T., Reynolds, S., Toller-Lobe, G. et Nagy, J. (2004). A longitudinal, controlled study of patient complaints following treated mild traumatic brain injury. *Arch Clin Neuropsychol*, 19(6), 805-816. doi: 10.1016/j.acn.2003.09.005
- Käthner, I., Wriessnegger, S. C., Müller-Putz, G. R., Kübler, A. et Halder, S. (2014). Effects of mental workload and fatigue on the P300, alpha and theta band power during operation of an ERP (P300) brain-computer interface. *Biol Psychol*, 102, 118-129. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.07.014>
- Kim, C., Cilles, S. E., Johnson, N. F. et Gold, B. T. (2012). Domain general and domain preferential brain regions associated with different types of task switching: a meta-analysis. *Hum Brain Mapp*, 33(1), 130-142. doi: 10.1002/hbm.21199
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Rev*, 29(2), 169-195. doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606-617. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
- Klimesch, W., Schack, B. et Sauseng, P. (2005). The functional significance of theta and upper alpha oscillations. *Exp Psychol*, 52(2), 99-108. doi: 10.1027/1618-3169.52.2.99
- Kluger, B. M., Krupp, L. B. et Enoka, R. M. (2013). Fatigue and fatigability in neurologic illnesses: proposal for a unified taxonomy. *Neurology*, 80(4), 409-416. doi: 10.1212/WNL.0b013e31827f07be
- Kohl, A. D., Wylie, G. R., Genova, H. M., Hillary, F. G. et Deluca, J. (2009). The neural correlates of cognitive fatigue in traumatic brain injury using functional MRI. *Brain Inj*, 23(5), 420-432. doi: 10.1080/02699050902788519
- Kontos, A. P., Elbin, R. J., Schatz, P., Covassin, T., Henry, L., Pardini, J. et Collins, M. W. (2012). A revised factor structure for the post-concussion symptom scale: baseline and postconcussion factors. *Am J Sports Med*, 40(10), 2375-2384. doi: 10.1177/0363546512455400
- Krupp, L. B., LaRocca, N. G., Muir-Nash, J. et Steinberg, A. D. (1989). The fatigue severity scale. Application to patients with multiple sclerosis and systemic lupus erythematosus. *Arch Neurol*, 46(10), 1121-1123.
- La Fontaine, M. F. (2018). An anatomical and physiological basis for the cardiovascular autonomic nervous system consequences of sport-related brain injury. *Int J Psychophysiol*, 132(Pt A), 155-166. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2017.11.016
- Lacouture, Y. et Cousineau, D. (2008). How to use MATLAB to fit the ex-Gaussian and other probability functions to a distribution of response times. *Tutorials in quantitative methods for psychology*, 4(1), 35-45.
- Lafrance, C. et Dumont, M. (2000). Diurnal variations in the waking EEG: comparisons with sleep latencies and subjective alertness. *Journal of sleep research*, 9(3), 243-248.

- Lee, K. A., Hicks, G. et Nino-Murcia, G. (1991). Validity and reliability of a scale to assess fatigue. *Psychiatry research*, 36(3), 291-298. doi: [https://doi.org/10.1016/0165-1781\(91\)90027-M](https://doi.org/10.1016/0165-1781(91)90027-M)
- Leung, S.-O. (2011). A Comparison of Psychometric Properties and Normality in 4-, 5-, 6-, and 11-Point Likert Scales. *Journal of Social Service Research*, 37(4), 412-421. doi: 10.1080/01488376.2011.580697
- Lipponen, J. A. et Tarvainen, M. P. (2019). A robust algorithm for heart rate variability time series artefact correction using novel beat classification. *J Med Eng Technol*, 43(3), 173-181. doi: 10.1080/03091902.2019.1640306
- Liu, K., Li, B., Qian, S., Jiang, Q., Li, L., Wang, W., . . . Sun, G. (2016). Mental fatigue after mild traumatic brain injury: a 3D-ASL perfusion study. *Brain Imaging Behav*, 10(3), 857-868. doi: 10.1007/s11682-015-9492-3
- Lorist, M. M. (2008). Impact of top-down control during mental fatigue. *Brain Research*, 1232, 113-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.053>
- Lorist, M. M., Bezdan, E., ten Caat, M., Span, M. M., Roerdink, J. B. et Maurits, N. M. (2009). The influence of mental fatigue and motivation on neural network dynamics; an EEG coherence study. *Brain Research*, 1270, 95-106.
- Lorist, M. M. et Faber, L. G. (2011). Consideration of the influence of mental fatigue on controlled and automatic cognitive processes and related neuromodulatory effects (*Cognitive fatigue: Multidisciplinary perspectives on current research and future applications*. (p. 105-126). Washington, DC, US: American Psychological Association.
- LSAT Logic Games: Strategy Guide + Online Ressources. (5th^e éd.). (2016). New York: Manhattan Prep Publishing.
- Luque-Casado, A., Perales, J. C., Cárdenas, D. et Sanabria, D. (2016). Heart rate variability and cognitive processing: The autonomic response to task demands. *Biol Psychol*, 113, 83-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.11.013>
- Mansfield, E. L., Karayanidis, F. et Cohen, M. X. (2012). Switch-related and general preparation processes in task-switching: evidence from multivariate pattern classification of EEG data. *J Neurosci*, 32(50), 18253-18258. doi: 10.1523/jneurosci.0737-12.2012
- Matsui, T., Omuro, H., Liu, Y.-F., Soya, M., Shima, T., McEwen, B. S. et Soya, H. (2017). Astrocytic glycogen-derived lactate fuels the brain during exhaustive exercise to maintain endurance capacity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(24), 6358-6363. doi: 10.1073/pnas.1702739114
- Maurer, U., Brem, S., Liechti, M., Maurizio, S., Michels, L. et Brandeis, D. (2015). Frontal Midline Theta Reflects Individual Task Performance in a Working Memory Task. *Brain Topography*, 28(1), 127-134. doi: 10.1007/s10548-014-0361-y
- Mayr, U. et Keele, S. W. (2000). Changing internal constraints on action: the role of backward inhibition. *J Exp Psychol Gen*, 129(1), 4-26. doi: 10.1037//0096-3445.129.1.4
- Mayr, U., LaRoux, C., Rolheiser, T., Osternig, L., Chou, L.-S. et van Donkelaar, P. (2014). Executive Dysfunction Assessed with a Task-Switching Task following Concussion. *PloS one*, 9(3), e91379. doi: 10.1371/journal.pone.0091379
- McAllister, T. W., Saykin, A. J., Flashman, L. A., Sparling, M. B., Johnson, S. C., Guerin, S. J., . . . Yanofsky, N. (1999). Brain activation during working memory 1 month after mild traumatic brain injury: a functional MRI study. *Neurology*, 53(6), 1300-1308.
- McAllister, T. W., Sparling, M. B., Flashman, L. A., Guerin, S. J., Mamourian, A. C. et Saykin, A. J. (2001). Differential working memory load effects after mild traumatic brain injury. *Neuroimage*, 14(5), 1004-1012. doi: 10.1006/nimg.2001.0899

- McAllister, T. W., Sparling, M. B., Flashman, L. A., McDonald, B. C., Wishart, H. et Saykin, A. J. (2002). *Working memory activation patterns 1 month and 1 year after mild traumatic brain injury: a longitudinal fMRI study*. Communication présentée The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences.
- McCrory, P., Meeuwisse, W., Dvorak, J., Aubry, M., Bailes, J., Broglio, S., . . . Vos, P. E. (2017). Consensus statement on concussion in sport—the 5th international conference on concussion in sport held in Berlin, October 2016. *British Journal of Sports Medicine*, 51(11), 838. doi: 10.1136/bjsports-2017-097699
- McGrath, N., Dinn, W. M., Collins, M. W., Lovell, M. R., Elbin, R. J. et Kontos, A. P. (2013). Post-exertion neurocognitive test failure among student-athletes following concussion. *Brain Inj*, 27(1), 103-113. doi: 10.3109/02699052.2012.729282
- Meier, T. B., Bellgowan, P. S. F., Singh, R., Kuplicki, R., Polanski, D. W. et Mayer, A. R. (2015). Recovery of Cerebral Blood Flow Following Sports-Related Concussion. *JAMA Neurology*, 72(5), 530-538. doi: 10.1001/jamaneurol.2014.4778
- Meier, T. B., Brummel, B. J., Singh, R., Nerio, C. J., Polanski, D. W. et Bellgowan, P. S. F. (2015). The underreporting of self-reported symptoms following sports-related concussion. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(5), 507-511. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.07.008>
- Melzack, R. (1975). The McGill Pain Questionnaire: major properties and scoring methods. *Pain*, 1(3), 277-299.
- Mizuhara, H., Wang, L. Q., Kobayashi, K. et Yamaguchi, Y. (2004). A long-range cortical network emerging with theta oscillation in a mental task. *Neuroreport*, 15(8), 1233-1238.
- Mizuhara, H. et Yamaguchi, Y. (2007). Human cortical circuits for central executive function emerge by theta phase synchronization. *Neuroimage*, 36(1), 232-244. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.02.026
- Mizuno, K., Tanaka, M., Yamaguti, K., Kajimoto, O., Kuratsune, H. et Watanabe, Y. (2011). Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity. *Behavioral and Brain Functions*, 7(1), 17. doi: 10.1186/1744-9081-7-17
- Mollayeva, T., Kendzerska, T., Mollayeva, S., Shapiro, C. M., Colantonio, A. et Cassidy, J. D. (2014). A systematic review of fatigue in patients with traumatic brain injury: the course, predictors and consequences. *Neurosci Biobehav Rev*, 47, 684-716. doi: 10.1016/j.neubiorev.2014.10.024
- Montenigro, P. H., Alosco, M. L., Martin, B. M., Daneshvar, D. H., Mez, J., Chaisson, C. E., . . . Tripodis, Y. (2017). Cumulative Head Impact Exposure Predicts Later-Life Depression, Apathy, Executive Dysfunction, and Cognitive Impairment in Former High School and College Football Players. *J Neurotrauma*, 34(2), 328-340. doi: 10.1089/neu.2016.4413
- Morin, C. M., Belleville, G., Bélanger, L. et Ivers, H. (2011). The Insomnia Severity Index: Psychometric Indicators to Detect Insomnia Cases and Evaluate Treatment Response. *sleep*, 34(5), 601-608.
- Nigbur, R., Ivanova, G. et Sturmer, B. (2011). Theta power as a marker for cognitive interference. *Clin Neurophysiol*, 122(11), 2185-2194. doi: 10.1016/j.clinph.2011.03.030
- Nordin, L. E., Moller, M. C., Julin, P., Bartfai, A., Hashim, F. et Li, T. Q. (2016). Post mTBI fatigue is associated with abnormal brain functional connectivity. *Sci Rep*, 6, 21183. doi: 10.1038/srep21183
- Norrie, J., Heitger, M., Leathem, J., Anderson, T., Jones, R. et Flett, R. (2010). Mild traumatic brain injury and fatigue: a prospective longitudinal study. *Brain Inj*, 24(13-14), 1528-1538. doi: 10.3109/02699052.2010.531687

- O'Jile, J. R., Ryan, L. M., Betz, B., Parks-Levy, J., Hilsabeck, R. C., Rhudy, J. L. et Gouvier, W. D. (2006). Information processing following mild head injury. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21(4), 293-296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.acn.2006.03.003>
- O'Keeffe, K., Hodder, S. et Lloyd, A. (2019). A comparison of methods used for inducing mental fatigue in performance research: individualised, dual-task and short duration cognitive tests are most effective. *Ergonomics*, 1-12. doi: 10.1080/00140139.2019.1687940
- Osborn, A. J., Mathias, J. L. et Fairweather-Schmidt, A. K. (2016). Prevalence of anxiety following adult traumatic brain injury: A meta-analysis comparing measures, samples and postinjury intervals. *Neuropsychology*, 30(2), 247.
- Ozen, L. J. et Fernandes, M. A. (2011a). Effects of "diagnosis threat" on cognitive and affective functioning long after mild head injury. *J Int Neuropsychol Soc*, 17(2), 219-229. doi: 10.1017/s135561771000144x
- Ozen, L. J. et Fernandes, M. A. (2011b). Slowing Down after a Mild Traumatic Brain Injury: A Strategy to Improve Cognitive Task Performance? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 27(1), 85-100. doi: 10.1093/arclin/acr087
- Ozen, L. J., Itier, R. J., Preston, F. F. et Fernandes, M. A. (2013). Long-term working memory deficits after concussion: electrophysiological evidence. *Brain Inj*, 27(11), 1244-1255. doi: 10.3109/02699052.2013.804207
- Pang, E. W., Dunkley, B. T., Doesburg, S. M., da Costa, L. et Taylor, M. J. (2016). Reduced brain connectivity and mental flexibility in mild traumatic brain injury. *Ann Clin Transl Neurol*, 3(2), 124-131. doi: 10.1002/acn3.280
- Pardini, M., Krueger, F., Raymont, V. et Grafman, J. (2010). Ventromedial prefrontal cortex modulates fatigue after penetrating traumatic brain injury. *Neurology*, 74(9), 749-754. doi: 10.1212/WNL.0b013e3181d25b6b
- Parks, A. C., Moore, R. D., Wu, C.-T., Broglio, S. P., Covassin, T., Hillman, C. H. et Pontifex, M. B. (2015). The association between a history of concussion and variability in behavioral and neuroelectric indices of cognition. *International Journal of Psychophysiology*, 98(3, Part 1), 426-434. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.08.006>
- Perneger, T. V. (1998). What's wrong with Bonferroni adjustments. *Bmj*, 316(7139), 1236-1238.
- Philipp, A. M. et Koch, I. (2006). Task inhibition and task repetition in task switching. *European Journal of Cognitive Psychology*, 18(4), 624-639. doi: 10.1080/09541440500423269
- Plukaard, S., Huizinga, M., Krabbendam, L. et Jolles, J. (2015). Cognitive flexibility in healthy students is affected by fatigue: An experimental study. *Learning and Individual Differences*, 38, 18-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.01.003>
- Posten, H. O. (1984). Robustness of the two-sample t-test (*Robustness of statistical methods and nonparametric statistics* (p. 92-99): Springer.
- Puma, S., Matton, N., Paubel, P.-V., Raufaste, É. et El-Yagoubi, R. (2018). Using theta and alpha band power to assess cognitive workload in multitasking environments. *International Journal of Psychophysiology*, 123, 111-120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.10.004>
- Rabinowitz, A. R. et Arnett, P. A. (2013). Intraindividual cognitive variability before and after sports-related concussion. *Neuropsychology*, 27(4), 481-490. doi: 10.1037/a0033023
- Rönnbäck, L. et Hansson, E. (2004). On the potential role of glutamate transport in mental fatigue. *Journal of Neuroinflammation*, 1(1), 22. doi: 10.1186/1742-2094-1-22
- Rosipal, R., Trejo, L. J. et Zaidel, E. (2013). *Atomic Decomposition of EEG for Mapping Cortical Activation*. Communication présentée Tensor Methods for Machine Learning Workshop.
- Ryu, K. et Myung, R. (2005). Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic. *International*

- Journal of Industrial Ergonomics*, 35(11), 991-1009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.04.005>
- Sammer, G., Blecker, C., Gebhardt, H., Bischoff, M., Stark, R., Morgen, K. et Vaitl, D. (2007). Relationship between regional hemodynamic activity and simultaneously recorded EEG-theta associated with mental arithmetic-induced workload. *Hum Brain Mapp*, 28(8), 793-803. doi: 10.1002/hbm.20309
- Sauseng, P., Hoppe, J., Klimesch, W., Gerloff, C. et Hummel, F. C. (2007). Dissociation of sustained attention from central executive functions: local activity and interregional connectivity in the theta range. *Eur J Neurosci*, 25(2), 587-593. doi: 10.1111/j.1460-9568.2006.05286.x
- Sauseng, P., Klimesch, W., Freunberger, R., Pecherstorfer, T., Hanslmayr, S. et Doppelmayr, M. (2006). Relevance of EEG alpha and theta oscillations during task switching. *Experimental Brain Research*, 170(3), 295-301. doi: 10.1007/s00221-005-0211-y
- Sauseng, P., Klimesch, W., Schabus, M. et Doppelmayr, M. (2005). Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive functions of working memory. *International Journal of Psychophysiology*, 57(2), 97-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.03.018>
- Schönberger, M., Herrberg, M. et Ponsford, J. (2014). Fatigue as a cause, not a consequence of depression and daytime sleepiness: a cross-lagged analysis. *J Head Trauma Rehabil*, 29(5), 427-431.
- Schönberger, M., Reutens, D., Beare, R., O'Sullivan, R., Rajaratnam, S. M. et Ponsford, J. (2016). Brain lesion correlates of fatigue in individuals with traumatic brain injury. *Neuropsychol Rehabil*, 1-15. doi: 10.1080/09602011.2016.1154875
- Schwarz, R., Krauss, O. et Hinz, A. (2003). Fatigue in the general population. *Onkologie*, 26(2), 140-144. doi: 69834
- Shaffer, F. et Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Front Public Health*, 5, 258. doi: 10.3389/fpubh.2017.00258
- Shou, G. et Ding, L. (2013, 3-7 July 2013). *Frontal theta EEG dynamics in a real-world air traffic control task*. Communication présentée 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). doi: 10.1109/EMBC.2013.6610818
- Sicard, V., Caron, G., Moore, R. D. et Ellemberg, D. (2019). Prevalence of Post-Exertion Cognitive Test Failure in Varsity Athletes with a History of Concussion. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 34(5), 791-791. doi: 10.1093/arclin/acz026.61
- Sicard, V., Lortie, J.-C., Moore, R. D. et Ellemberg, D. (2018). Return to play following a sports concussion: The “added value” of post-exertion assessment. *Neurology*, 91(23 Supplement 1), S7-S8. doi: 10.1212/01.wnl.0000550637.26394.9a
- Sicard, V., Moore, R. D. et Ellemberg, D. (2018). Long-term cognitive outcomes in male and female athletes following sport-related concussions. *Int J Psychophysiol*, 132(Pt A), 3-8. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2018.03.011
- Sinnott, A. M., Kontos, A. P., Collins, M. W. et Ortega, J. (2020). Concussion Symptoms Among Athletes: Preinjury Factors Predict Postinjury Factors. *J Head Trauma Rehabil*, 35(4), E361-E371. doi: 10.1097/htr.0000000000000562
- Smets, E. M., Garssen, B., Bonke, B. et De Haes, J. C. (1995). The Multidimensional Fatigue Inventory (MFI) psychometric qualities of an instrument to assess fatigue. *J Psychosom Res*, 39(3), 315-325.

- Sohn, M.-H., Ursu, S., Anderson, J. R., Stenger, V. A. et Carter, C. S. (2000). The role of prefrontal cortex and posterior parietal cortex in task switching. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(24), 13448. doi: 10.1073/pnas.240460497
- Stuss, D. T., Stethem, L. L., Hugenholtz, H., Picton, T., Pivik, J. et Richard, M. T. (1989). Reaction time after head injury: fatigue, divided and focused attention, and consistency of performance. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 52(6), 742. doi: 10.1136/jnnp.52.6.742
- Tapper, A., Gonzalez, D., Roy, E. et Niechwiej-Szwedo, E. (2017). Executive function deficits in team sport athletes with a history of concussion revealed by a visual-auditory dual task paradigm. *J Sports Sci*, 35(3), 231-240. doi: 10.1080/02640414.2016.1161214
- Tarvainen, M. P., Niskanen, J. P., Lipponen, J. A., Ranta-Aho, P. O. et Karjalainen, P. A. (2014). Kubios HRV--heart rate variability analysis software. *Comput Methods Programs Biomed*, 113(1), 210-220. doi: 10.1016/j.cmpb.2013.07.024
- Thayer, J. F., Hansen, A. L., Saus-Rose, E. et Johnsen, B. H. (2009). Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health. *Ann Behav Med*, 37(2), 141-153. doi: 10.1007/s12160-009-9101-z
- Theriault, M., De Beaumont, L., Gosselin, N., Filipinni, M. et Lassonde, M. (2009). Electrophysiological abnormalities in well functioning multiple concussed athletes. *Brain Inj*, 23(11), 899-906. doi: 10.1080/02699050903283189
- Trejo, L. J. (2011). Advanced Physiological Estimation of Cognitive Status: PACIFIC DEVELOPMENT AND TECHNOLOGY LLC PALO ALTO CA.
- Trejo, L. J., Kubitz, K., Rosipal, R., Kochavi, R. L. et Montgomery, L. D. (2015). EEG-based estimation and classification of mental fatigue. *Psychology*, 6(05), 572.
- van der Linden, D., Frese, M. et Meijman, T. F. (2003). Mental fatigue and the control of cognitive processes: effects on perseveration and planning. *Acta Psychol (Amst)*, 113(1), 45-65. doi: 10.1016/s0001-6918(02)00150-6
- Van Dongen, H. P. A., Belenky, G. et Krueger, J. M. (2011). Investigating the temporal dynamics and underlying mechanisms of cognitive fatigue (*Cognitive fatigue: Multidisciplinary perspectives on current research and future applications*. (p. 127-147). Washington, DC, US: American Psychological Association.
- van Donkelaar, P., Langan, J., Rodriguez, E., Drew, A., Halterman, C., Osternig, L. R. et Chou, L. S. (2005). Attentional deficits in concussion. *Brain Inj*, 19(12), 1031-1039. doi: 10.1080/02699050500110363
- van Zomeren, A. H., Brouwer, W.H., & Deelman, B.G. (1984). Attentional deficits: The riddles of selectivity, speed and alertness. Dans D. Brooks (dir.), *Closed head injury: Psychological, social and family consequences*. Oxford: Oxford University Press.
- Vynorius, K. C., Paquin, A. M. et Seichepine, D. R. (2016). Lifetime Multiple Mild Traumatic Brain Injuries Are Associated with Cognitive and Mood Symptoms in Young Healthy College Students. *Front Neurol*, 7, 188. doi: 10.3389/fneur.2016.00188
- Wascher, E., Rasch, B., Sanger, J., Hoffmann, S., Schneider, D., Rinkenauer, G., . . . Gutberlet, I. (2014). Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. *Biol Psychol*, 96, 57-65. doi: 10.1016/j.biopsycho.2013.11.010
- Whelan, R. (2008). Effective analysis of reaction time data. *The Psychological Record*, 58(3), 475-482.
- Worringer, B., Langner, R., Koch, I., Eickhoff, S. B., Eickhoff, C. R. et Binkofski, F. C. (2019). Common and distinct neural correlates of dual-tasking and task-switching: a meta-

- analytic review and a neuro-cognitive processing model of human multitasking. *Brain Structure and Function*, 224(5), 1845-1869. doi: 10.1007/s00429-019-01870-4
- Zaidel, E., Rosipal, R., Hill, A., Fernandes, N., Akbarut, R., Noh, S. et Trejo, L. J. (2013). Modeling EEG-band Neurofeedback.
- Zhang, C. et Yu, X. (2010). Estimating mental fatigue based on electroencephalogram and heart rate variability. *Polish Journal of Medical Physics And Engineering*, 16(2), 67-84.
- Zhao, C., Zhao, M., Liu, J. et Zheng, C. (2012). Electroencephalogram and electrocardiograph assessment of mental fatigue in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 83-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.11.019>
- Ziino, C. et Ponsford, J. (2005). Measurement and prediction of subjective fatigue following traumatic brain injury. *J Int Neuropsychol Soc*, 11(4), 416-425. doi: 10.1017/s1355617705050472
- Ziino, C. et Ponsford, J. (2006a). Selective attention deficits and subjective fatigue following traumatic brain injury. *Neuropsychology*, 20(3), 383-390. doi: 10.1037/0894-4105.20.3.383
- Ziino, C. et Ponsford, J. (2006b). Vigilance and fatigue following traumatic brain injury. *J Int Neuropsychol Soc*, 12(1), 100-110. doi: 10.1017/s1355617706060139

Annexe A - Formulaire d'information et de consentement



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

**Étude sur les effets d'un effort cognitif prolongé chez des athlètes ayant ou non déjà
subi une commotion cérébrale**

ÉTUDIANT-CHERCHEUR :

Gabriel Caron

Candidat à la maîtrise en psychologie

Laboratoire des neurosciences du développement, de l'exercice et de la vision

Coordonnées :

CEPSUM, 2100 boul. Édouard-Montpetit, Montréal (Qc), H3T 1J4

Bureau au 6^e étage, Bureau 6209-1

Courriel : gabriel.caron.1@umontreal.ca

Téléphone : 514-343-6111 poste : 29914

DIRECTEUR DE RECHERCHE :

Dave Ellemberg, Ph.D Neuropsychologue

Professeur titulaire, Département de Kinésiologie, Université de Montréal

Coordonnées :

CEPSUM, 2100 boul. Édouard-Montpetit, Montréal (Qc), H3T 1J4

Bureau au 8^e étage, local 8221

Courriel : dave.ellemberg@umontreal.ca

Téléphone : 514-343-7830

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche. Avant d'accepter d'y participer, veuillez prendre le temps de lire ce document présentant les conditions de participation au projet. N'hésitez pas à poser toutes les questions que vous jugerez utiles à la personne qui vous présente ce document.

Le Laboratoire des neurosciences du développement, de la vision et de l'exercice du Département de kinésiologie de l'Université de Montréal effectue des études ayant pour but d'améliorer les connaissances sur les commotions cérébrales.

Quelle est la nature de ce projet?

La présente étude a pour objectif de mieux comprendre les conséquences des commotions cérébrales sur la fatigue ressentie au quotidien ainsi que la fatigabilité en contexte d'effort mental soutenu.

Comment se déroulera le projet?

La première partie du projet consistera à remplir des questionnaires au laboratoire, qui traiteront d'informations générales, de l'historique scolaire, médical et de votre historique de commotions cérébrales, mais aussi de la dépression, de l'anxiété, de l'attention, de la douleur, du sommeil et de la fatigue au quotidien. Cette étape ne devrait pas prendre plus de 30 minutes.

La seconde partie du projet consistera en une expérimentation au laboratoire qui se déroulera un autre jour, d'après les étapes principales suivantes:

1. Un cardiofréquencemètre sera placé au-dessus du ventre et en-dessous de la poitrine afin de mesurer la fréquence cardiaque et le rythme respiratoire durant l'expérimentation (voir image ci-dessous).



2. Un filet d'électroencéphalographie sera placé sur votre tête afin de prendre des mesures de l'activité électrique de votre cerveau. L'installation devrait prendre 25 minutes environ (voir image ci-dessous).



3. Une fois le filet EEG placé et la qualité des données vérifiée, une courte période de repos de 5 minutes sera donnée, où l'on vous demandera de rester assis et le dos droit pendant que des données seront récoltées par le cardiofréquencemètre et l'électroencéphalographe.
4. Ensuite, on vous demandera de compléter une tâche cognitive sur ordinateur, d'une durée d'environ 25 minutes, où vous devrez répondre en fonction de deux règles expliquées au préalable, puis alterner entre les deux règles, pendant que le cardiofréquencemètre et l'électroencéphalographe enregistreront les données.

5. Après la complétion de la tâche, on vous demandera de compléter une épreuve de raisonnement d'une durée de 45 à 60 minutes, composée exclusivement de jeux de logique.
6. Finalement, on vous demandera de répéter la même tâche cognitive sur ordinateur, d'une durée maximale de 25 minutes, pendant que le cardiofréquencemètre et l'électroencéphalographe enregistreront les données.
7. Notez qu'au début et entre chacune des étapes précédentes, on vous demandera d'indiquer vos niveaux (de 0 à 10) de fatigue cognitive, d'effort et de motivation à réaliser les tâches.

Conditions de participation

Pour participer à la présente étude, vous devez remplir les critères suivants :

Critères d'inclusion

- Athlètes âgés (hommes ou femmes) entre 18 et 30 ans;
- Participant à une équipe sportive de façon compétitive (hockey, soccer, football, lacrosse, rugby, cheerleading, volleyball, athlétisme, natation, etc.);
- Étudiant au cégep ou à l'université;
- Ayant ou n'ayant jamais subi de commotion cérébrale d'origine sportive dont la plus récente remonte à 2 mois minimum et 24 mois maximum.

Critères d'exclusion

- Problèmes neurologiques (épilepsie, migraines, démence, maladies cérébro-vasculaires, AVC, sclérose en plaques, infections du système nerveux, tumeurs au cerveau), troubles neuro-développementaux (trouble du spectre de l'autisme, TDAH, troubles de communication, troubles moteurs, troubles spécifiques des apprentissages, déficience intellectuelle) ou problèmes psychiatriques (dépression, psychose, anxiété, trouble bipolaire, schizophrénie) ;
- Trauma cranio-cérébral qui n'est pas d'origine sportive ;

- Fracture du crâne ;
- Historique d'opération au cerveau ;
- Utilisation de médicaments ayant des effets psychoactifs;
- Pathologie systémique importante ;
- Abus de substances;
- Anesthésie générale au cours des 2 dernières années;
- Troubles de la vision importants et daltonisme.

Avantages et bénéfices

Les participants auront la satisfaction d'avoir contribué à l'avancement des connaissances quant aux conséquences d'une commotion cérébrale.

Inconvénients et risques

Les principaux inconvénients de cette étude sont le déplacement au laboratoire et le temps consacré à l'étude.

De plus, il se pourrait que vous sentiez un inconfort ou une perte de motivation liés à la fatigue au cours de l'étude, mais également faire resurgir des symptômes liés à votre commotion cérébrale (si vous avez un historique de commotion).

La pose du filet d'électroencéphalographie nécessite l'utilisation d'un gel abrasif pour enlever les excès de peau morte et de sébum afin d'augmenter le contact électrique entre les électrodes et la peau, ce qui pourrait engendrer de légères irritations aux régions de la peau se situant juste en dessous des électrodes. De plus, les électrodes seront trempées dans une solution d'eau saline, ce qui aura pour conséquence de mouiller les cheveux et possiblement les vêtements. La pose du cardiofréquencemètre aura également pour effet de mouiller votre chandail.

Finalement, comme l'objectif de l'étude est de provoquer une fatigue cognitive, il est important de mentionner qu'aucune pause n'est prévue au cours de l'expérimentation, car

une pause aurait pour effet de vous reposer et d'affecter les résultats. Vous serez donc invité à aller aux toilettes avant de commencer l'expérimentation. Toutefois, sachez qu'en cas d'envie pressante, il sera toujours possible d'interrompre l'expérimentation.

Assistance en cas d'urgence

Si vous deviez subir un préjudice par suite de la passation du test informatique ou de l'épreuve de raisonnement, qui demanderont un effort mental soutenu, vous recevrez l'assistance immédiate requise par votre état de santé, sans frais de votre part. Si les symptômes de fatigue ressentis sont trop importants au cours de la présente étude ou si vous ressentez des symptômes liés à une commotion cérébrale, il suffira de le signaler au chercheur afin que ce dernier mette fin à l'expérimentation. Le chercheur vous invitera à vous reposer au laboratoire et vous offrira de l'eau et une collation. Si les symptômes persistent, des mesures seront prises afin de vous référer à la clinique de médecine sportive du Cepsum.

Découvertes fortuites

Trois outils de dépistage seront administrés lors de la présente étude, concernant, respectivement, la dépression, l'anxiété et le trouble du déficit d'attention. Vous serez informé si les résultats à l'un des trois outils de dépistage sont positifs. À votre demande, nous vous fournirons une liste de ressources si vous désirez obtenir un suivi professionnel.

Confidentialité

Les informations provenant de l'évaluation seront utilisées uniquement dans le cadre de la présente étude. Votre nom sera remplacé par un code afin de rendre les informations confidentielles. Les dossiers demeureront sous clé dans notre laboratoire. Seuls les membres de l'équipe de recherche auront accès aux dossiers. Les données seront conservées en lieu sûr pour une durée de 7 ans, et seront par la suite détruites. Si vous souhaitez vous retirer de l'étude, toutes les données vous concernant seront détruites. Les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un congrès scientifique, mais aucune information permettant de vous identifier ne sera alors dévoilée.

Participation volontaire et droit de retrait

Vous êtes libre d'accepter ou de refuser de participer à ce projet de recherche. Vous pouvez vous retirer à n'importe quel moment de l'étude, sans avoir à donner de raison. La participation au projet de recherche, le refus de participer ou votre retrait n'aura pas de conséquence sur les services ou les soins que vous pourriez recevoir auprès de du Cepsum ou de la Clinique de médecine sportive de l'Université de Montréal. Vous n'avez qu'à aviser l'expérimentateur ou la personne ressource de l'équipe de recherche, et ce, par simple avis verbal.

Responsabilité de l'équipe de recherche

En acceptant de participer à cette étude, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs ou l'établissement de leurs responsabilités civiles et professionnelles.

Personnes-ressources

Si vous avez des questions sur les aspects scientifiques du projet de recherche ou si vous souhaitez vous retirer de l'étude, vous pouvez contacter :

Gabriel Caron

Candidat à la maîtrise en psychologie et responsable du projet

Laboratoire des neurosciences du développement, de l'exercice et de la vision

CEPSUM, 2100 boul. Édouard-Montpetit, Montréal (Qc), H3T 1J4 (Bureau 6209-1)

Courriel : gabriel.caron.1@umontreal.ca

Téléphone : 514-343-6111 poste:29914

Dave Ellemberg, Ph.D Neuropsychologue

Professeur titulaire, Département de Kinésiologie, Université de Montréal

CEPSUM, 2100 boul. Édouard-Montpetit, Montréal (Qc), H3T 1J4 (Bureau 8221)

Courriel : dave.ellemberg@umontreal.ca

Téléphone : 514-343-7830

Pour toute préoccupation sur vos droits ou sur les responsabilités des chercheurs concernant votre participation à ce projet, vous pouvez contacter le conseiller en éthique du Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC) :

Courriel: cerc@umontreal.ca

Téléphone : (514) 343-6111 poste 27395

Site Web: <http://recherche.umontreal.ca/participants>

Toute plainte concernant cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal, au numéro de téléphone (514) 343-2100 ou à l'adresse courriel ombudsman@umontreal.ca. L'ombudsman accepte les appels à frais virés. Il s'exprime en français et en anglais et prend les appels entre 9h et 17h.

Consentement

Déclaration du participant

Je comprends que je peux prendre mon temps pour réfléchir avant de donner mon accord ou non à participer à l'étude.

Je peux poser des questions à l'équipe de recherche et exiger des réponses satisfaisantes.

Je comprends qu'en participant à ce projet de recherche, je ne renonce à aucun de mes droits ni ne dégage les chercheurs de leurs responsabilités.

J'ai pris connaissance du présent formulaire d'information et de consentement et j'accepte de participer au projet de recherche.

Acceptez-vous que le chercheur responsable de ce projet de recherche ou un membre de son personnel de recherche reprenne contact avec vous pour vous proposer de participer à d'autres projets de recherche approuvés par un Comité d'éthique de la recherche de l'Université de Montréal? Bien sûr, lors de ce contact, vous serez libre d'accepter ou de refuser de participer aux projets de recherche proposés. ☐ Oui ☐ Non

Prénom et nom du participant

Signature du participant

Date : _____

Engagement du chercheur

J'ai expliqué les conditions de participation au projet de recherche au participant. J'ai répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées et me suis assuré de la compréhension du participant. Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au présent formulaire d'information et de consentement.

Prénom et nom du chercheur

Signature du chercheur

Date : _____

Annexe B – Questionnaire d’informations générales

Questionnaire de participation à l’étude

Code du participant : _ _ _ _ _

1. Informations générales

Âge : _____ Date de naissance (AAAA-MM-JJ) : _____

Genre : Féminin ☐ Masculin ☐ Autres ☐

Langue maternelle : _____

Taille (cm) : _____ Poids (kg) : _____

Latéralité : Droite ☐ Gauche ☐ Ambidextre parfait ☐

2. Informations relatives au sport

Quel sport pratiquez-vous? _____

Depuis combien d’années pratiquez-vous ce sport? _____

À quelle position jouez-vous ? _____

Avez-vous déjà joué à d’autres positions? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, laquelle ou lesquelles? _____

Dans quelles ligues, associations ou niveaux avez-vous joué? _____

Avez-vous déjà pratiqué d’autres sports de manière compétitive? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, lequel ou lesquels? _____

3. Scolarité

Années de scolarité (en commençant du primaire) : _____

Niveau de scolarité atteint : _____

Domaine d'études : _____

Année répétée : ☐ Oui ☐ Non Si oui, laquelle? _____

Saut d'une année : ☐ Oui ☐ Non Si oui, laquelle? _____

Difficulté académique : ☐ Oui ☐ Non Si oui, laquelle? _____

Trouble d'apprentissage : ☐ Oui ☐ Non Si oui, lequel? _____

Trouble de déficit de l'attention : ☐ Oui ☐ Non

Avec hyperactivité : ☐ Oui ☐ Non

4. Informations médicales

Avez-vous déjà eu une maladie :

▪ Cardiovasculaire (ex. hypertension, angine de poitrine) ☐ Oui ☐ Non
Si oui, laquelle? _____

▪ Respiratoire (ex. asthme, emphysème) ☐ Oui ☐ Non
▪ Si oui, laquelle? _____

▪ Métabolique (ex. diabète, hypoglycémie, anémie) ☐ Oui ☐ Non

▪ Si oui, laquelle? _____

▪ Musculo-squelettique (ex. arthrose, dorsalgie) ☐ Oui ☐ Non

▪ Si oui, laquelle? _____

▪ Neurologique (ex. épilepsie, sclérose en plaques) ☐ Oui ☐ Non

▪ Si oui, laquelle? _____

▪ Cancer (ex. leucémie, tumeur au cerveau) ☐ Oui ☐ Non

▪ Si oui, lequel? _____

▪ Trouble psychiatrique (ex. dépression, psychose, anxiété) ☐ Oui ☐ Non

Si oui, lequel? _____

- Autres : _____

Médication

Consommez-vous des médicaments avec prescription (ex. pompes pour l'asthme, pilule contraceptive, accutane, antidouleurs, somnifères, Ritalin, Concerta)? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, lesquels et posologie (quantité et fréquence)? _____

Avez-vous déjà consommé des médicaments pour un désordre psychiatrique (ex. antipsychotiques, anxiolytiques, antidépresseurs)? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, lesquels et posologie (quantité et fréquence)? _____

Vision

Êtes-vous atteint de daltonisme? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, quel type? _____

Êtes-vous atteint de troubles de la vision (ex. myopie, astigmatisme, hypermétropie, décollement de la rétine)? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, lequel ou lesquels? _____

Votre vue est-elle corrigée à 20/20? _____

Avez-vous des problèmes de perception visuelle (ex. distance, profondeur, vitesse)?

☐ Oui ☐ Non

Audition

Êtes-vous atteint d'une perte auditive? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, quel type? _____

Avez-vous des problèmes de perception auditive (localisation des sources ou autres)?

☐ Oui ☐ Non

Notes : _____

Opérations

Avez-vous déjà subi des opérations? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, dans quelles circonstances? _____

Avez-vous déjà été sous anesthésie générale? ☐ Oui ☐ Non

5. Consommation de substances exogènes

Alcools

Consommez-vous ou avez-vous déjà consommé de l'alcool (ex. bière, vin, alcools forts)? ☐ Oui
☐ Non

Si oui, à quelle fréquence? _____

Combien de consommations d'alcool consommez-vous en une occasion et quel type d'alcool?

Vous est-il déjà arrivé de consommer de l'alcool et de ne plus vous souvenir des événements de la journée précédente? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, combien de fois? _____

Avez-vous besoin d'alcool pour vous amuser? ☐ Oui ☐ Non

En avez-vous consommé dans les dernières 24 heures? _____

Drogues

Consommez-vous ou avez-vous déjà consommé des drogues (ex. marijuana, cocaïne, hallucinogènes, amphétamine)? ☐ Oui ☐ Non

Si oui, lesquelles? _____

À quelle fréquence? _____

Vous est-il déjà arrivé de consommer de la drogue et de ne plus vous souvenir des événements de la journée précédente? ☐ Oui ☐ Non

Avez-vous besoin de drogues pour vous amuser? ☐ Oui ☐ Non

En avez-vous consommé dans les dernières 24 heures? _____

Caféine

Consommez-vous ou avez-vous déjà consommé de la caféine (ex. café, capsule, thé, boissons énergisantes)? _____

Si oui, lesquelles? _____

À quelle fréquence? _____

En avez-vous consommé dans les dernières 24 heures? _____

6. Accidents impliquant la tête

Avez-vous déjà subi une commotion cérébrale avant celle-ci? ☐ Oui ☐ Non

Avez-vous déjà subi un accident impliquant la tête, d'origine autre que sportive?

☐ Oui ☐ Non

Est-ce que cette ou ces blessure(s) ont été diagnostiquée(s) par un professionnel de la santé? ☐
Oui ☐ Non

Circonstances de la dernière commotion cérébrales (ex. chute, tête contre tête, collision) :

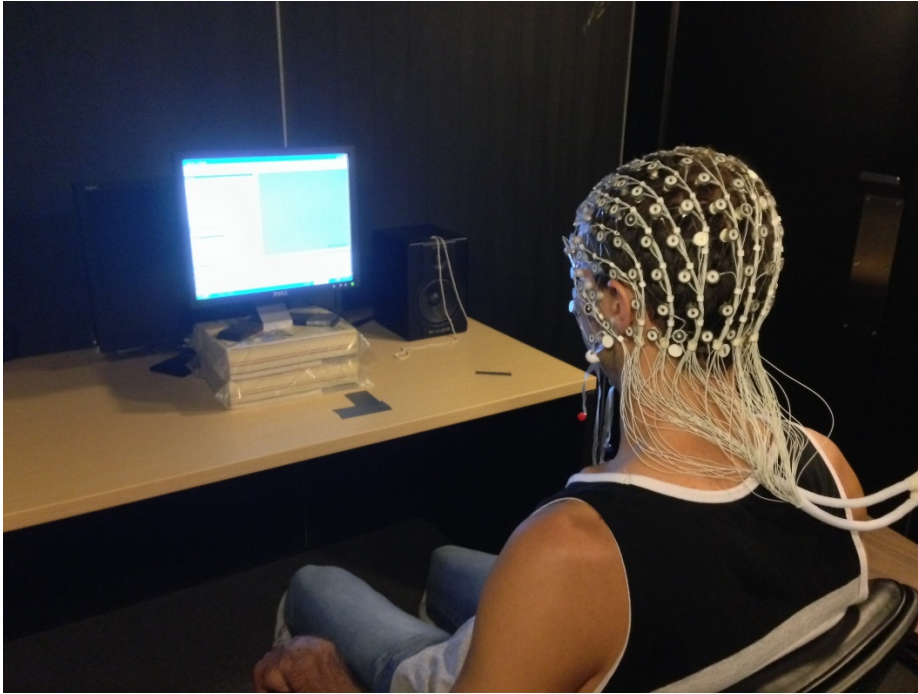
Veuillez indiquer la date de tout incident impliquant la tête durant un match ou une séance d'entraînement ou tout incident avec une partie du corps ayant mené à une secousse au cerveau avec le plus de précision possible. Ensuite, veuillez cocher les symptômes ressentis lors et suite à chacun des incidents dans la colonne correspondante.

	Commotions ou traumatismes crâniens				
	#1	#2	#3	#4	#5
Date AAAA-MM-JJ					
Circonstances					
Perte de conscience					
Amnésie avant l'incident					
Amnésie après l'incident					
Maux de tête					
Maux de cou					
Nausées ou vomissements					
Pression dans la tête					
Étourdissements					
Confusion					
Somnolence					
Vision floue					
Problèmes d'audition					
Sensibilité à la lumière					
Sensibilité au son					
Impression d'être au ralenti					
Impression d'être dans la brume					
Ne pas se sentir bien					
Difficulté à se concentrer					
Trouble de mémoire					
Problème d'équilibre					
Fatigue					
Labilité émotionnelle					
Irritabilité					

Annexe C - Zephyr (BioHarness 3.0, Zephyr technology, Annapolis, USA)



Annexe D - Filet d'électroencéphalographie, Geodesic Sensor Net™ (GSN, Electrical Geodesic System Inc., Eugene, USA



Annexe E - Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh

Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh (IQSP 1.0)

Date : _____ NI : _____

Instructions :

Les questions suivantes font référence à vos habitudes de sommeil au cours du dernier mois seulement. Vos réponses devraient correspondre aux meilleures estimations possibles pour la majorité des jours et des nuits au cours du dernier mois. S'il vous plaît, répondez à toutes les questions.

1. Durant le dernier mois, à quelle heure vous êtes-vous couché?
Heure habituelle de coucher : _____

2. Durant le dernier mois, combien de temps (en minutes) avez-vous pris pour vous endormir à chaque soir?
Nombre de minutes : _____

3. Durant le dernier mois, à quelle heure vous êtes-vous levé(e) le matin?
Heure habituelle de lever : _____

4. Durant le dernier mois, combien d'heures de sommeil avez-vous eu par nuit? (Ceci peut-être différent du nombre d'heures passées au lit)?

Nombre d'heures de sommeil par nuit : _____

Pour chacune des questions suivantes, cochez la meilleure réponse.

SVP, répondez à toutes les questions.

5. Durant le dernier mois, combien de fois avez-vous eu de la difficulté à dormir parce que vous...

	Pas durant le dernier mois	Moins d'une fois par semaine	Une ou deux fois par semaine	Trois fois ou plus par semaine
a) ne pouviez pas vous endormir à l'intérieur de 30 minutes.				
b) vous réveilliez au milieu de la nuit ou tôt le matin				
c) deviez vous lever pour aller à la salle de bains				
d) ne pouviez pas respirer facilement				
e) toussiez ou ronfliez bruyamment				
f) aviez trop froid				
g) aviez trop chaud				
h) aviez fait de mauvais rêves				

i) ressentiez de la douleur				
j) autre(s) raison(s), svp décrivez : _____ _____ —				

6. Durant le dernier mois, comment évalueriez-vous la qualité globale de votre sommeil ?

Très bien _____ Plutôt bien _____ Plutôt mal _____ Très mal _____

7. Durant le dernier mois, combien de fois avez-vous pris une médication (avec ou sans ordonnance) pour vous aider à dormir?

Pas durant le dernier mois : _____ Moins d'une fois par semaine : _____ Une ou deux fois par semaine : _____ 3 fois ou plus par semaine : _____

8. Durant le dernier mois, combien de fois avez-vous eu de la difficulté à rester éveillé(e) pendant que vous conduisiez, mangiez ou vous engagiez dans une activité sociale?

Pas durant le dernier mois : _____ Moins d'une fois par semaine : _____ Une ou deux fois par semaine : _____ 3 fois ou plus par semaine : _____

9. Durant le dernier mois, jusqu'à quel point avez-vous eu de la difficulté à maintenir suffisamment d'enthousiasme pour compléter vos activités?

Aucune _____ Légère _____ Quelque peu _____ Beaucoup _____

Annexe F – Index de Sévérité de l’Insomnie

Index de Sévérité de l’Insomnie (ISI)

Nom: _____

Date: _____

Pour chacune des questions, veuillez encercler le chiffre correspondant à votre réponse.

1. Veuillez estimer la **SÉVÉRITÉ** actuelle (dernier mois) de vos difficultés de sommeil.

a. Difficultés à s'endormir:

Aucune	Légère	Moyenne	Très	Extrêmement
0	1	2	3	4

b. Difficultés à rester endormi(e):

0	1	2	3	4
---	---	---	---	---

b. Problèmes de réveils trop tôt le matin:

0	1	2	3	4
---	---	---	---	---

2. Jusqu'à quel point êtes-vous **SATISFAIT(E)/INSATISFAIT(E)** de votre sommeil actuel?

Très Satisfait	Satisfait	Plutôt Neutre	Insatisfait	Très Insatisfait
0	1	2	3	4

3. Jusqu'à quel point considérez-vous que vos difficultés de sommeil **PERTURBENT** votre fonctionnement quotidien (p. ex., fatigue, concentration, mémoire, humeur)?

Aucunement	Légerement	Moyennement	Très	Extrêmement
0	1	2	3	4

4. À quel point considérez-vous que vos difficultés de sommeil sont **APPARENTES** pour les autres en termes de détérioration de la qualité de votre vie?

Aucunement	Légerement	Moyennement	Très	Extrêmement
0	1	2	3	4

5. Jusqu'à quel point êtes-vous **INQUIET(ÈTE)/préoccupé(e)** à propos de vos difficultés de sommeil?

Aucunement	Légerement	Moyennement	Très	Extrêmement
0	1	2	3	4

Copyright C. Morin (1993)

Échelle de correction/interprétation:

Additionner le score des sept items (1a+1b+1c+2+3+4+5) = _____

Le score total varie entre 0 et 28

0-7 = Absence d'insomnie

8-14 = Insomnie sub-clinique (légère)

15-21 = Insomnie clinique (modérée)

22-28 = Insomnie clinique (sévère)

Annexe G – Échelle de somnolence d'Epworth

Échelle de somnolence d'Epworth

Quel risque avez-vous de vous assoupir ou de vous endormir dans les situations suivantes, sans considérer les moments où vous vous sentez fatigué(e) ? Ces questions s'appliquent à vos habitudes de vie actuelles, dans des conditions habituelles. Si vous n'avez pas effectué récemment certaines activités, essayez d'imaginer comment vous auriez réagi. Utilisez l'échelle ci-dessous en choisissant le chiffre le plus approprié pour chaque situation.

- 0 : aucun risque de m'assoupir ou de m'endormir
- 1 : faible risque de m'assoupir ou de m'endormir
- 2 : risque modéré de m'assoupir ou de m'endormir
- 3 : risque élevé de m'assoupir ou de m'endormir

Situations

Scores (0, 1, 2 ou 3)

Lire en position assise	_____
Regarder la télévision	_____
Être assis(e) inactif(ve) dans un lieu public (théâtre, réunion, par exemple)	_____
Être assis(e) en tant que passager(ère) dans un véhicule pour une période d'une heure sans arrêt	_____
Être étendu(e) l'après-midi lorsque les circonstances le permettent	_____
Être assis(e) en parlant avec quelqu'un	_____
Être assis(e) tranquille après un repas <u>sans</u> boisson alcoolique	_____
Dans une voiture arrêtée quelques minutes à un feu de circulation ou dans la circulation	_____
Total :	_____

Annexe H – Inventaire de dépression de Beck



Date:

année / mois / jour

Nom _____ Situation de famille _____ ☐ marié(e) ☐ vivant en union libre
☐ divorcé(e) ☐ veuf(ve)
☐ séparé(e) ☐ célibataire
 Âge _____ Sexe _____ ☐ M ☐ F Profession _____ Niveau d'études _____

Consigne : Ce questionnaire comporte 21 groupes d'énoncés. Veuillez lire avec soin chacun de ces groupes puis, dans chaque groupe, choisissez l'énoncé qui décrit le mieux comment vous vous êtes senti(e) **au cours des deux dernières semaines, incluant aujourd'hui**. Encercliez alors le chiffre placé devant l'énoncé que vous avez choisi. Si, dans un groupe d'énoncés, vous en trouvez plusieurs qui semblent décrire exactement ce que vous ressentez, choisissez celui qui a le chiffre le plus élevé et encercliez-le. Assurez-vous de ne choisir qu'un seul énoncé dans chaque groupe, y compris le groupe n° 16 (modifications dans les habitudes de sommeil) et le groupe n° 18 (modifications de l'appétit).

1 Tristesse

- 0 Je ne me sens pas triste.
- 1 Je me sens très souvent triste.
- 2 Je suis tout le temps triste.
- 3 Je suis si triste ou si malheureux(se) que ce n'est pas supportable.

2 Pessimisme

- 0 Je ne suis pas découragé(e) face à mon avenir.
- 1 Je me sens plus découragé(e) qu'avant face à mon avenir.
- 2 Je ne m'attends pas à ce que les choses s'arrangent pour moi.
- 3 J'ai le sentiment que mon avenir est sans espoir et qu'il ne peut qu'empirer.

3 Échecs dans le passé

- 0 Je n'ai pas le sentiment d'avoir échoué dans la vie ou d'être un(e) raté(e).
- 1 J'ai échoué plus souvent que je n'aurais dû.
- 2 Quand je pense à mon passé, je constate un grand nombre d'échecs.
- 3 J'ai le sentiment d'avoir complètement raté ma vie.

4 Perte de plaisir

- 0 J'éprouve toujours autant de plaisir qu'avant quant aux choses qui me plaisent.
- 1 Je n'éprouve pas autant de plaisir quant aux choses qu'avant.
- 2 J'éprouve très peu de plaisir quant aux choses qui me plaisaient habituellement.
- 3 Je n'éprouve aucun plaisir quant aux choses qui me plaisaient habituellement.

5 Sentiments de culpabilité

- 0 Je ne me sens pas particulièrement coupable.
- 1 Je me sens coupable pour bien des choses que j'ai faites ou que j'aurais dû faire.
- 2 Je me sens coupable la plupart du temps.
- 3 Je me sens tout le temps coupable.

6 Sentiment d'être puni(e)

- 0 Je n'ai pas le sentiment d'être puni(e).
- 1 Je sens que je pourrais être puni(e).
- 2 Je m'attends à être puni(e).
- 3 J'ai le sentiment d'être puni(e).

7 Sentiments négatifs envers soi-même

- 0 Mes sentiments envers moi-même n'ont pas changé.
- 1 J'ai perdu confiance en moi.
- 2 Je suis déçu(e) par moi-même.
- 3 Je ne m'aime pas du tout.

8 Attitude critique envers soi

- 0 Je ne me blâme pas ou ne me critique pas plus que d'habitude.
- 1 Je suis plus critique envers moi-même que je ne l'étais.
- 2 Je me reproche tous mes défauts.
- 3 Je me reproche tous les malheurs qui arrivent.

9 Pensées ou désirs de suicide

- 0 Je ne pense pas du tout à me suicider.
- 1 Il m'arrive de penser à me suicider, mais je ne le ferais pas.
- 2 J'aimerais me suicider.
- 3 Je me suiciderais si l'occasion se présentait.

PsychCorp

Les Éditions
du Centre
de Psychologie
Appliquée

Sous-total, page 1

Verso

Traduction et adaptation permises. Copyright © 1997 par Aaron T. Beck. Traduction française et adaptation canadienne copyright © 2005 par NCS Pearson, Inc. et Pearson Canada Assessment, Inc. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ou transmise sous quelque forme que ce soit ou par quelque moyen que ce soit, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'enregistrement ou l'utilisation de systèmes d'emmagasinement et de récupération de l'information, sans la permission écrite de l'éditeur. Tous droits réservés. Imprimé au Canada.

Pour commander des Cahiers de notation du BDI-II, appelez le 1-866-335-8427.
ISBN-10 : 0-7747-5231-9 / ISBN-13 : 978-0-7747-5231-2

10 Pleurs

- 0 Je ne pleure pas plus qu'avant.
- 1 Je pleure plus qu'avant.
- 2 Je pleure pour la moindre petite chose.
- 3 Je voudrais pleurer mais je n'en suis pas capable.

11 Agitation

- 0 Je ne suis pas plus agité(e) ou plus tendu(e) que d'habitude.
- 1 Je me sens plus agité(e) ou plus tendu(e) que d'habitude.
- 2 Je suis si agité(e) ou tendu(e) que j'ai du mal à rester tranquille.
- 3 Je suis si agité(e) ou tendu(e) que je dois continuellement bouger ou faire quelque chose.

12 Perte d'intérêt

- 0 Je n'ai pas perdu d'intérêt pour les gens ou pour les activités.
- 1 Je m'intéresse moins qu'avant aux gens et aux choses.
- 2 Je ne m'intéresse presque plus aux gens et aux choses.
- 3 J'ai du mal à m'intéresser à quoi que ce soit.

13 Indécision

- 0 Je prends des décisions toujours aussi bien qu'avant.
- 1 Il m'est plus difficile que d'habitude de prendre des décisions.
- 2 J'ai beaucoup plus de mal qu'avant à prendre des décisions.
- 3 J'ai du mal à prendre n'importe quelle décision.

14 Dévalorisation

- 0 Je pense être quelqu'un de valable.
- 1 Je ne crois pas avoir autant de valeur ni être aussi utile qu'avant.
- 2 Je me sens moins valable que les autres.
- 3 Je sens que je ne vaudrais absolument rien.

15 Perte d'énergie

- 0 J'ai toujours autant d'énergie qu'avant.
- 1 J'ai moins d'énergie qu'avant.
- 2 Je n'ai pas assez d'énergie pour pouvoir faire grand-chose.
- 3 J'ai trop peu d'énergie pour faire quoi que ce soit.

16 Modifications dans les habitudes de sommeil

- 0 Mes habitudes de sommeil n'ont pas changé.
- 1a Je dors un peu plus que d'habitude.
- 1b Je dors un peu moins que d'habitude.
- 2a Je dors beaucoup plus que d'habitude.
- 2b Je dors beaucoup moins que d'habitude.
- 3a Je dors presque toute la journée.
- 3b Je me réveille une ou deux heures plus tôt et je suis incapable de me rendormir.

17 Irritabilité

- 0 Je ne suis pas plus irritable que d'habitude.
- 1 Je suis plus irritable que d'habitude.
- 2 Je suis beaucoup plus irritable que d'habitude.
- 3 Je suis constamment irritable.

18 Modifications de l'appétit

- 0 Mon appétit n'a pas changé.
- 1a J'ai un peu moins d'appétit que d'habitude.
- 1b J'ai un peu plus d'appétit que d'habitude.
- 2a J'ai beaucoup moins d'appétit que d'habitude.
- 2b J'ai beaucoup plus d'appétit que d'habitude.
- 3a Je n'ai pas d'appétit du tout.
- 3b J'ai constamment envie de manger.

19 Difficulté à se concentrer

- 0 Je parviens à me concentrer toujours aussi bien qu'avant.
- 1 Je ne parviens pas à me concentrer aussi bien que d'habitude.
- 2 J'ai du mal à me concentrer longtemps sur quoi que ce soit.
- 3 Je me trouve incapable de me concentrer sur quoi que ce soit.

20 Fatigue

- 0 Je ne suis pas plus fatigué(e) que d'habitude.
- 1 Je me fatigue plus facilement que d'habitude.
- 2 Je suis trop fatigué(e) pour faire un grand nombre de choses que je faisais avant.
- 3 Je suis trop fatigué(e) pour faire la plupart des choses que je faisais avant.

21 Perte d'intérêt pour le sexe

- 0 Je n'ai pas noté de changement récent dans mon intérêt pour le sexe.
- 1 Le sexe m'intéresse moins qu'avant.
- 2 Le sexe m'intéresse beaucoup moins maintenant.
- 3 J'ai perdu tout intérêt pour le sexe.

Note: Ce formulaire est imprimé en noir et bleu.
Si ces deux couleurs n'apparaissent pas sur le
présent exemplaire, c'est qu'il a été photocopié en
violation des lois ayant trait aux droits d'auteur.

Sous-total, page 2

Sous-total, page 1

Score total

Annexe I – Inventaire d'anxiété de Beck



Nom : _____ Date : _____

Voici une liste des symptômes couramment associés à l'anxiété. Veuillez lire attentivement chaque item de la liste. Indiquez, en inscrivant un X dans la case appropriée, à quel point vous avez été incommodé(e) par chacun de ces symptômes au cours DE LA DERNIÈRE SEMAINE, Y COMPRIS AUJOURD'HUI.

	Pas du tout	Légèrement Cela ne m'a pas beaucoup dérangé.	Modérément C'était très déplaisant mais supportable.	Fortement Je pouvais à peine le supporter.
1. sensations d'engourdissement ou de picotement				
2. bouffées de chaleur				
3. tremblements dans les jambes (jambes molles)				
4. incapable de se détendre				
5. craindre que le pire ne survienne				
6. étourdissements ou faiblesses				
7. palpitations ou cœur qui bat fort				
8. chancelant(e) ou manque d'assurance				
9. terrifié(e)				
10. nerveux(se)				
11. sensations d'étouffement				
12. mains qui tremblent				
13. avoir des tremblements				
14. crainte de perdre le contrôle				
15. difficulté à respirer				
16. peur de mourir				
17. être effrayé(e)				
18. indigestions ou malaises abdominaux				
19. s'évanouir				
20. avoir la face qui rougit				
21. transpiration (qui n'est pas due à la chaleur)				



Traduction et adaptation permises. Copyright © 1987 par NCS Pearson, Inc. Traduction française et adaptation canadienne copyright © 1990 par NCS Pearson, Inc. et Pearson Canada Assessment, Inc. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ou transmise sous quelque forme que ce soit ou par quelque moyen que ce soit, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'enregistrement ou l'utilisation de systèmes d'emménagement et de récupération de l'information, sans la permission écrite de l'éditeur. Tous droits réservés. Imprimé au Canada.

5 6 7 B C D E

Pour commander des Cahiers de notation du BAI, appelez le 1-866-335-8427
ISBN-10: 0-7747-5312-9 / ISBN-13: 978-0-7747-5312-8

Annexe J - CAARS

CAARS - Auto-évaluation - Version longue

Nom :	Sexe :	M	F
Date de naissance :	Age :	Date du jour :	

Instructions : Pour les énoncés suivants, encerclez le nombre qui indique si l'énoncé est 'pas du tout vrai', 'un peu vrai', 'assez vrai' ou 'très vrai'. 'Pas du tout' veut dire que l'énoncé est rarement ou jamais un problème. 'Très vrai' veut dire que l'énoncé est souvent un problème ou se présente très souvent. 'Un peu vrai' ou 'assez vrai' sont entre les deux. Veuillez répondre à chacun des énoncés

	Pas du tout vrai	un peu vrai	assez vrai	très vrai
1. J'aime faire des choses actives.	0	1	2	3
2. Je perd de choses qui sont nécessaires pour des tâches ou des activités (p.ex., listes, crayons, livres, ou outils).	0	1	2	3
3. Je ne planifie pas à l'avance.	0	1	2	3
4. Je dis tout ce qui me passe par la tête.	0	1	2	3
5. Je prends des risques ou je suis un casse-cou.	0	1	2	3
6. Je m'apitoie sur mon sort.	0	1	2	3
7. Je ne termine pas les choses que je commence.	0	1	2	3
8. Je me sens facilement frustré.	0	1	2	3
9. Je parle trop.	0	1	2	3
10. Je suis toujours en train de faire quelque chose, comme si j'étais conduit pour un moteur.	0	1	2	3
11. Je suis désorganisé.	0	1	2	3
12. Je dis des choses sans réfléchir.	0	1	2	3
13. J'ai de la difficulté à rester en place pour une longue période de temps.	0	1	2	3
14. J'ai de la difficulté à faire des loisirs sans faire de bruit.	0	1	2	3
15. Je ne suis pas sûr de moi.	0	1	2	3
16. C'est difficile pour moi de tenir compte de plusieurs choses à la fois.	0	1	2	3
17. Je bouge tout le temps, même quand je dois être immobile.	0	1	2	3
18. J'oublie de me rappeler de certaines choses.	0	1	2	3
19. J'explose facilement / je me fâche facilement.	0	1	2	3
20. Je m'ennuie facilement.	0	1	2	3
21. Je quitte ma place alors que je ne suis pas supposé.	0	1	2	3
22. J'ai de mal à attendre en ligne ou à attendre mon tour.	0	1	2	3
23. Il m'arrive de piquer des crises.	0	1	2	3
24. J'ai de la difficulté à demeurer attentif sur mon travail.	0	1	2	3
25. Je cherche des activités rapides et excitantes.	0	1	2	3
26. J'évite les nouveaux défis parce que je n'ai pas foi en mes capacités.	0	1	2	3
27. Je me sens agité à l'intérieur même quand je suis assis tranquillement.	0	1	2	3
28. Les choses que je vois et entends me distraient de ce que je fais.	0	1	2	3
29. J'ai des oublis durant mes activités de tous les jours.	0	1	2	3
30. Plusieurs choses me fâchent facilement.	0	1	2	3
31. Je n'aime pas les activités calmes qui font appel à l'introspection.	0	1	2	3
32. Je perds les choses dont j'ai besoin.	0	1	2	3
33. J'ai de la difficulté à écouter ce que les autres disent.	0	1	2	3

	Pas du tout vrai	un peu vrai	assez vrai	très vrai
34. Je ne prend pas des défis qui sont à la hauteur de mes capacités.	0	1	2	3
35. J'interromps les autres lorsqu'ils parlent.	0	1	2	3
36. Je change de plan ou de travail à mi-chemin.	0	1	2	3
37. J'agis correctement à l'extérieur, mais à l'intérieur je n'ai pas confiance en moi.	0	1	2	3
38. Je suis toujours en pleine action.	0	1	2	3
39. Je fais des commentaires ou des remarques que j'aimerais pouvoir reprendre.	0	1	2	3
40. Je ne peux pas accomplir des choses à moins d'avoir un échéancier ferme.	0	1	2	3
41. Je bouge mes mains ou mes pieds nerveusement, ou me tortille sur ma chaise.	0	1	2	3
42. Je fais de erreurs à cause de négligence ou j'ai de la difficulté à être attentif aux détails.	0	1	2	3
43. Je pile sur les pieds des gens sans le vouloir.	0	1	2	3
44. J'ai de la difficulté à démarrer une tâche.	0	1	2	3
45. Je m'immisce dans les activités des autres.	0	1	2	3
46. Cela me demande un grand effort pour rester assis sans bouger.	0	1	2	3
47. Mes états d'âmes sont imprévisibles.	0	1	2	3
48. Je n'aime pas les devoirs ou les tâches à mon travail qui me demandent de beaucoup réfléchir.	0	1	2	3
49. Je suis distrait dans mes activités de la vie de tous les jours.	0	1	2	3
50. Je suis agité ou sur actif.	0	1	2	3
51. Je dépends des autres pour garder ma vie en ordre et pour être attentif aux détails.	0	1	2	3
52. Je tape sur les nerfs de gens sans le vouloir.	0	1	2	3
53. Parfois mon attention devient si étroite que j'ignore toutes autres choses; d'autres fois mon attention est tellement large que tout me distrait.	0	1	2	3
54. Je me tortille ou bouge nerveusement.	0	1	2	3
55. Je ne peux pas rester attentif sur une tâche, à moins qu'elle soit très intéressante.	0	1	2	3
56. J'aimerais avoir une plus grande confiance en mes habiletés.	0	1	2	3
57. Je ne peux pas rester assis sans bouger très longtemps.	0	1	2	3
58. Je donne des réponses aux questions avant qu'elle soit posée complètement.	0	1	2	3
59. J'aime être dans l'action plutôt que de rester en place.	0	1	2	3
60. J'ai de la difficulté à terminer mes tâches au travail ou mes devoirs.	0	1	2	3
61. Je suis irritable.	0	1	2	3
62. J'interrompt les autres quand ils travaillent ou ils jouent.	0	1	2	3
63. Mes échecs du passé font que j'ai du mal à croire en moi.	0	1	2	3
64. Je suis facilement distrait lorsqu'il y a des choses qui se passent autour de moi.	0	1	2	3
65. J'ai de la difficulté à organiser mes tâches et activités.	0	1	2	3
66. J'ai de la difficulté à juger le temps qu'il faut pour faire quelque chose ou aller quelque part.	0	1	2	3

Annexe K – Inventaire de la douleur de McGill (version courte)

Dossier _____
Date _____

Questionnaire McGill sur la douleur: version courte (SF-MPQ)

A. VEUILLEZ DECRIRE LE TYPE DE DOULEUR QUE VOUS AVEZ EU AU COURS DE CETTE DERNIERE SEMAINE.

Cochez ☒ une case par ligne.

	Pas de douleur	Légère	Modérée	Forte
1. Lancinante	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
2. Fulgurante	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
3. En coups de poignard	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
4. Aigüe	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
5. Pareille à une crampe	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
6. Pareille à une morsure	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
7. Cuisante – brûlante	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
8. Diffuse	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
9. Qui pèse	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
10. Sensible au toucher	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
11. Déchirante	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
12. Fatigante – épuisante	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
13. À donner la nausée	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
14. Angoissante	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
15. Violente – cruelle	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3

B. VEUILLEZ EVALUER VOTRE DOULEUR AU COURS DE CETTE DERNIERE SEMAINE

La ligne ci-dessous représente l'intensité croissante de votre douleur, allant de "pas de douleur" à "douleur la plus forte possible". Placez un trait vertical (|) sur la ligne à l'endroit qui correspond le mieux à l'intensité de votre douleur au cours de cette dernière semaine.

Pas de douleur	Douleur la plus forte possible
	Score en mm (Investigator's use only)

C. INTENSITÉ ACTUELLE DE LA DOULEUR

Pas de douleur	Légère	Modérée	Forte	Très forte	Insupportable
<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

MERCI D'AVOIR RÉPONDU À TOUTES LES QUESTIONS

Score

Sensitif : _____ Affectif : _____ Catégorie Évaluative : _____ Score total: _____
Question 1 à 11 Question 12 à 15 Question C (S+A+E)

QVAS

1 – Quelle est votre douleur actuellement ?

Pas de douleur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Douleur extrême
----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	-----------------

2 – Quelle est votre douleur moyenne ou votre douleur de base ?

Pas de douleur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Douleur extrême
----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	-----------------

3 – Quelle est votre douleur lorsqu'elle atteint son niveau le plus bas (À son intensité minimale, jusqu'à quel point votre douleur se rapproche-t-elle de 0) ?

Pas de douleur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Douleur extrême
----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	-----------------

4 – Quelle est votre douleur lorsqu'elle atteint son niveau le plus élevé (à son intensité maximale, jusqu'à quel point votre douleur se rapproche-t-elle de 10) ?

Pas de douleur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Douleur extrême
----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	-----------------

Commentaires :

Annexe L – Échelle de gravité de la fatigue

ECHELLE DE SEVERITE DE FATIGUE

(Fatigue Severity Scale FSS)

- Lisez chaque item et cochez/entourez un chiffre qui s'applique le plus à vous durant la semaine passée.
- Une valeur basse indique que l'affirmation ne s'applique pas tout à fait ou pas du tout, tandis qu'une valeur élevée indique que l'affirmation s'applique fortement à votre état ou à ce que vous avez ressenti au cours de la semaine passée.

QUESTIONNAIRE

« *Durant la semaine passée j'ai trouvé que...* »

Score/Intensité

Je suis moins motivé quand je suis fatigué(e)	1	2	3	4	5	6	7
L'exercice physique me rend fatigué	1	2	3	4	5	6	7
Je suis facilement fatigué(e)	1	2	3	4	5	6	7
La fatigue gêne mon fonctionnement physique	1	2	3	4	5	6	7
La fatigue me cause fréquemment des problèmes	1	2	3	4	5	6	7
Ma fatigue m'empêche d'avoir une activité physique soutenue	1	2	3	4	5	6	7
La fatigue m'empêche d'accomplir certains devoirs et responsabilités	1	2	3	4	5	6	7
La fatigue est parmi mes trois symptômes les plus invalidants	1	2	3	4	5	6	7
La fatigue interfère avec ma vie professionnelle et/ou familiale et/ou sociale	1	2	3	4	5	6	7

SCORE MOYEN : (Total/9)

SCORE TOTAL :

D'après : Krupp, L.B., La Rocca, N.G., Muir-Nash, J., Steinberg, A.D., 1989. The fatigue severity scale. Application to patients with multiple sclerosis and systemic lupus erythematosus. Archives of Neurology 46, 1121-3.

Annexe M – Inventaire multidimensionnel de la fatigue



Inventaire multidimensionnel de la fatigue (IMF)

NOM :

DATE :

Au moyen des énoncés suivants, nous aimerions comprendre comment vous vous sentiez récemment.

Voici un exemple d'énoncé : **J e me sens reposé(e).**

Si vous pensez que cet énoncé est entièrement vrai, c'est-à-dire que vous êtes tout à fait d'accord avec celui-ci, encerclez le chiffre 5 à droite de l'énoncé, comme ceci : **J e me sens reposé(e).** 1 2 3 4 5

Répondez à toutes les questions en encerclant le chiffre approprié selon l'échelle suivante :

<< PAS DU TOUT D'ACCORD

TOUT A FAIT D'ACCORD >>

	VOTRE RÉPONSE					POUR LA CORRECTION*				
	1	2	3	4	5	GÉN	PHY	MEN	ACT	MOT
1. J e me sens en forme.						6-rep				
2. Physiquement, je n'ai pas la force de faire grand-chose.										
3. J e me sens très actif.									6-rep	
4. J 'ai envie de faire plein de choses agréables.										6-rep
5. J e me sens fatigué(e).										
6. J e crois que j'en fais beaucoup dans une journée.									6-rep	
7. J e suis capable de me concentrer sur ce que j'entreprends.								6-rep		
8. J 'ai une bonne résistance physique.							6-rep			
9. J e suis stressé(e) à l'idée d'avoir quelque chose à faire.										
10. J e crois que je fais très peu dans une journée.										
11. J 'arrive facilement à me concentrer.								6-rep		
12. J e me sens reposé(e).						6-rep				
13. Il me faut beaucoup d'efforts pour me concentrer.										
14. Physiquement, je me sens en mauvaise condition.										
15. J 'ai beaucoup de projets.										6-rep
16. J e me fatigue facilement.										
17. J e n'achève que très peu de choses.										
18. J 'ai envie de ne rien faire.										
19. J e me laisse facilement distraire.										
20. Physiquement, je me sens en excellente forme.							6-rep			
TOTAUX										

*Retranscrire les réponses encrées dans les cases vides. Pour les items 1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 15 et 20 faire de la correction identique : 6-rep à 11 l'opposé inverse la score : 6-rep à 10 « réponse encrée » et inscrire le résultat dans la case. En bas de page, calculer les totaux des cinq sous-échelles en additionnant les chiffres inscrits dans les cases de correction.

Inventaire multidimensionnel de la fatigue, © E. Smets, B. Garssen, B. Bonke, 1995. Reproduit avec permission.

Annexe N – Échelles de Likert

Échelles visuelles analogues (n° __)

En ce moment, je me sens...

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Pas fatigué

Très fatigué

En ce moment, je fais...

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Aucun effort

Beaucoup

d'efforts

En ce moment je suis...

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Pas motivé

Très motivé

Annexe O – Épreuve de raisonnement



Épreuve de raisonnement

Nom : _____

Prénom : _____

À lire avant de débiter

Cette épreuve est composée de plusieurs mises en situation visant à évaluer le raisonnement. Il s'agit de puzzles ayant plusieurs critères à respecter et plusieurs réponses possibles. Autrement dit, si une réponse respecte les critères de la mise en situation, cette réponse n'est pas nécessairement la seule réponse possible. Il est donc recommandé de porter bien attention à chacune des questions qui seront présentées.

*Finally, les mises en situation et les questions doivent être répondues d'après leur ordre de présentation (#1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8...). **Ainsi, si une question est particulièrement difficile, nous vous demandons de ne pas la sauter et de vous efforcer à trouver la réponse avant de passer à la question suivante.** Une période d'une heure vous est donnée pour compléter l'épreuve de raisonnement. Il est, cependant, normal de ne pas avoir suffisamment de temps pour répondre à toutes les questions en ce laps de temps. **Nous vous demandons de prioriser la qualité de vos réponses à la quantité, tout en répondant au plus de questions possibles.***

Partie 1

Les questions 1 à 3 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

À un concert, huit compositions (F, H, L, O, P, R, S et T) sont jouées une fois chaque et une à la fois. L'ordre de leur performance doit suivre les conditions suivantes :

- T est jouée immédiatement avant F ou immédiatement après R.
- Au moins deux compositions sont jouées ou bien après F et avant R, ou après R et avant F.
- O est jouée en première ou en cinquième position.
- La huitième composition jouée doit être L ou bien H.
- P est jouée à un certain moment avant S.
- Au moins une composition est jouée après O et avant S, ou après S et avant O.

1. Quelle suite liste les compositions dans un ordre dans lequel elles pourraient être jouées durant le concert, de la première à la huitième ?

- a) L, P, S, R, O, T, F, H

- b) O, T, P, F, S, H, R, L
- c) P, T, F, S, L, R, O, H
- d) P, T, F, S, O, R, L, H
- e) T, F, P, R, O, L, S, H

2. P ne peut pas être jouée...

- a) En deuxième position
- b) En troisième position
- c) En quatrième position
- d) En sixième position
- e) En septième position

3. Si T est jouée en cinquième position et F en sixième position, alors S doit être jouée en...

- a) En quatrième ou en septième position
- b) Troisième ou sixième position
- c) Troisième ou quatrième position
- d) Deuxième ou septième position
- e) Première ou quatrième position

Partie 2

Les questions 4 à 6 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

Une maison d'édition a publié exactement 6 romans (*Forgiven*, *Grain*, *Highwire*, *June*, *Lampoon* et *Meltd*) entre 1991 et 1996. Seulement un roman a été publié pour chacune de ces six années. Trois auteurs (Robinson, Stewart et Tamiko) ont chacun écrit deux de ces romans. Les conditions suivantes s'appliquent :

- *L'un des romans de Robinson a été publié avant la publication du premier roman de Stewart.*
- *Aucun des romans de Robinson n'a été publié en 1991 ou 1994.*
- *Aucun auteur n'a publié de romans deux années consécutives.*
- *June fut publié en 1994.*
- *Highwire fut publié exactement deux ans après Meltd.*

4) Laquelle des réponses suivantes pourrait être une représentation adéquate des auteurs et des romans qu'ils ont écrit, en ordre de publication (de gauche à droite, de haut en bas)?

- a) Tamiko : *Lampoon*; Robinson : *Grain*;
Tamiko : *Forgiven*; Stewart: *Melted*;
Robinson: *June*; Stewart: *Highwire*
- b) Tamiko: *Lampoon*; Robinson: *Forgiven*;
Stewart: *Melted*; Tamiko: *June*;
Robinson: *Highwire*; Stewart: *Grain*
- c) Stewart: *Melted*; Robinson: *Lampoon*;
Stewart: *Highwire*; Tamiko: *June*;
Robinson: *Forgiven*; Tamiko: *Grain*
- d) Tamiko: *Melted*; Robinson: *Grain*;
Stewart: *Highwire*; Stewart: *June*;
Tamiko: *Forgiven*; Robinson: *Lampoon*
- e) Robinson: *Forgiven*; Tamiko: *Grain*;
Stewart: *Melted*; Robinson: *June*;
Tamiko: *Highwire*; Stewart: *Lampoon*

5) Si *Forgiven* était publié en 1995, chacune de ces propositions pourrait être vraie, SAUF...

- a) Stewart a écrit *Grain*.
- b) Tamiko a écrit *June*.
- c) Tamiko a écrit *Highwire*.
- d) Robinson a écrit *Lampoon*.
- e) Robinson a écrit *Highwire*.

6) Si *Lampoon* a été publié durant l'année qui précède immédiatement la publication de *Melted*, laquelle de ces propositions doit être vraie ?

- a) Tamiko a écrit *Forgiven*.
- b) Tamiko a écrit *Grain*.
- c) Robinson a écrit *Lampoon*.
- d) Robinson a écrit *Highwire*.
- e) Stewart a écrit *Melted*.

Partie 3

Les questions 7 à 9 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

Une compagnie de tours guidés offre six tours chaque jour. Chaque tour est dirigé par l'un de six guides (Jack, Kaley, Lyle, Moquette, Naru et Olley). Chaque guide est assigné à un tour. De plus, chaque guide est expérimenté ou inexpérimenté. En organisant les tours de la journée, les conditions suivantes s'appliquent :

- *Deux tours consécutifs ne peuvent être donnés par des guides inexpérimentés.*
- *Il y a exactement deux tours entre celui donné par Lyle et celui de Moquette.*
- *Le tour de Kaley est soit immédiatement avant, doit immédiatement après celui de Olley.*
- *Jack dirige le quatrième tour.*
- *Le troisième tour est dirigé par un guide inexpérimenté.*
- *Kaley et Olley sont deux guides expérimentés.*

7) Laquelle des propositions suivantes, si elle était substituée par la règle selon laquelle deux tours consécutifs ne peuvent être donnés par des guides inexpérimentés, donnerait le même effet?

- a) Deux tours consécutifs ne peuvent être donnés par des guides expérimentés.
- b) Un guide inexpérimenté ne peut diriger ni le second tour, ni le quatrième.
- c) Chaque tour dirigé par un guide inexpérimenté doit suivre et être suivi par un tour dirigé par un guide expérimenté.
- d) Naru et exactement un autre guide sont inexpérimentés.
- e) Jack est un guide expérimenté, tout comme deux autres guides qui le précèdent et au moins un des guides qui le suivent.

8) Laquelle des propositions suivantes donnerait le même résultat si elle était substituée par la règle selon laquelle il y a exactement deux tours entre celui donné par Lyle et celui de Moquetta?

- a) Ou bien Moquetta, ou bien Lyle dirige le troisième tour.
- b) Ou bien Moquetta, ou bien Lyle dirige le dernier tour.
- c) Ou bien Kaley, ou bien Olley dirige le premier tour, alors que Naru dirige le cinquième tour.
- d) Ou bien Kaley, ou bien Olley dirige le premier tour, alors que Lyle ou Moquetta dirige le troisième tour.
- e) Le tour dirigé par Naru précède celui dirigé par Moquetta ou celui dirigé Lyle, mais non les deux.

9) Si la règle selon laquelle le tour que Kaley dirige est soit immédiatement avant, soit immédiatement après le tour dirigé par Olley était remplacée par la règle stipulant qu'il doit y avoir exactement deux heures séparant les tours que Kaley et Olley dirigent, laquelle des propositions suivantes doit être vraie?

- a) Olley doit diriger le second tour.
- b) Naru doit diriger le cinquième tour.
- c) Moquetta doit diriger le sixième tour.
- d) Le tour de Naru ne doit pas directement précéder ou directement suivre n'importe quel tour dirigé par Moquetta.
- e) Le tour de Jack ne peut directement précéder ou directement suivre n'importe quel tour dirigé par Lyle.

Partie 4

Les questions 10 à 12 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

La docteure X va rencontrer exactement 5 patients parmi 7 – K, L, M, N, O, P et Q – qui sont tous en train d’attendre dans le lobby. Elle rencontrera les patients un à la fois et en ordre. Les conditions suivantes s’appliquent :

- Elle rencontrera K et M, et elle rencontrera K avant M.
- Si elle ne rencontre pas O, elle rencontrera P.
- Elle rencontrera Q ou P, mais pas les deux.
- Si elle rencontre L ou Q, elle les rencontrera après M.
- Si elle rencontre N, elle doit rencontrer N en premier.

10) Laquelle des propositions suivantes pourrait représenter l’ordre des patients rencontrés par la docteure X, du premier au dernier?

- a) N, Q, K, M, P
- b) N, Q, K, O, M
- c) N, Q, K, M, L
- d) N, Q, K, M, O
- e) N, Q, M, K, O

11) Chacune des propositions suivantes pourrait être vraie, exceptée...

- a) La docteure voit Q en premier.
- b) La docteure voit M en deuxième.
- c) La docteure voit K en quatrième.
- d) La docteure voit P en dernier.
- e) La docteure voit Q en dernier.

12) Si la docteure rencontre M en quatrième position, laquelle des propositions suivantes pourrait être vraie ?

- a) La docteure rencontre K en premier.
- b) La docteure rencontre K en deuxième.
- c) La docteure rencontre P en premier.
- d) La docteure rencontre Q en dernier.
- e) La docteure rencontre P en dernier.

Partie 5

Les questions 13 à 15 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

La compagnie Mizotron a exactement six gestionnaires : Holmes, Jin, Kaufman, Lu, Orr et Pearson.

Chacun de ces gestionnaires a de l'expertise dans au moins l'un de ces trois domaines : finance, marketing, technologie. Aucun des gestionnaires n'a d'expertise dans d'autres domaines que ceux mentionnés. Les conditions suivantes s'appliquent :

- *Jin ne partage aucun domaine d'expertise avec Orr.*
- *Holmes a moins de domaines d'expertise que Lu.*
- *Jin, Kaufman et Pearson ont tous de l'expertise en finance.*
- *Holmes et Pearson ont exactement deux domaines d'expertise en commun.*
- *Orr n'a pas d'expertise en marketing.*

13) Laquelle de ces paires de gestionnaires doit avoir au moins un domaine d'expertise en commun ?

- a) Holmes et Kaufman
- b) Kaufman et Orr
- c) Lu et Orr
- d) Holmes et Jin
- e) Jin et Orr

14) Pour combien des six gestionnaires est-il possible de déterminer exactement quel(s) domaine(s) d'expertise ils ont?

- a) un
- b) deux
- c) trois
- d) quatre
- e) cinq

15) Laquelle des propositions suivantes doit être fausse ?

- a) Jin et Pearson ont tous les deux de l'expertise en marketing.
- b) Lu et Orr ont tous les deux de l'expertise en technologie.
- c) Holmes et Lu ont tous les deux de l'expertise en marketing.
- d) Holmes et Orr ont tous les deux de l'expertise en finance.
- e) Kaufman et Pearson ont tous les deux de l'expertise en technologie.

Partie 6

Les questions 16 à 18 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

Exactement six représentants commerciaux négocient un traité : Klosnik, Londi, Manley, Neri, Osata, Poirier. Il y a exactement six chaises disposées également autour d'une table circulaire. Les chaises sont numérotées de 1 à 6, avec les chaises de nombres successifs sont placées l'une à côté de l'autre et la chaise 1 à côté de la chaise 6. Chaque chaise est occupée par exactement un des représentants. Les conditions suivantes s'appliquent.

- *Poirier est assis immédiatement à côté de Neri.*
- *Londi est assis immédiatement à côté de Manley, Neri, ou les deux.*
- *Klosnik n'est pas assis immédiatement à côté de Manley.*
- *Si Osata est assis immédiatement à côté de Poirier, Osata n'est pas assis immédiatement à côté de Manley.*

16) Si Londi est assis immédiatement à côté de Poirier, laquelle des propositions suivantes est une paire de représentants devant s'asseoir immédiatement l'un à côté de l'autre ?

- a) Klosnik et Osata
- b) Londi et Neri
- c) Londi et Osata
- d) Manley et Neri
- e) Manley et Poirier

17) Si Klosnik est assis directement entre Londi et Poirier, alors Manley doit être assis directement entre...

- a) Londi et Neri
- b) Londi et Osata
- c) Neri et Osata
- d) Neri et Poirier
- e) Osata et Poirier

18) Si Londi est assis immédiatement à côté de Manley, alors laquelle des listes suivantes est une liste complète et précise des représentants pouvant s'asseoir immédiatement à côté de Londi ?

- a) Klosnik
- b) Klosnik, Neri
- c) Neri, Poirier
- d) Klosnik, Osata, Poirier
- e) Klosnik, Neri, Osata, Poirier

Partie 7

Les questions 19 à 21 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

Exactement sept professeurs – Madison, Nilsson, Orozco, Paton, Robinson, Sarkis et Togo – ont été engagés depuis l’année 1989 à l’année 1995. Chaque professeur a une ou plusieurs spécialités et si des professeurs sont engagés la même année ou à des années consécutives (ex. 1994- 1995), ils n’ont aucune spécialité en commun. Les professeurs ont été engagés d’après les conditions suivantes :

- *Madison a été engagé en 1993, Robinson en 1991.*
- *Il y a au moins une spécialité que Madison, Orozco et Togo ont en commun.*
- *Nilsson a une spécialité en commun avec Robinson.*
- *Paton et Sarkis ont été engagés au moins un an avant Madison et au moins un an après Nilsson.*
- *Orozco, qui partage une spécialité avec Sarkis, a été engagé en 1990.*

19) Laquelle des listes suivantes est une liste complète et précise des professeurs qui pourraient avoir été engagés entre les années 1989 et 1991 ?

- a) Nilsson, Orozco, Robinson
- b) Orozco, Robinson, Sarkis
- c) Nilsson, Orozco, Paton, Robinson
- d) Nilsson, Orozco, Paton, Sarkis
- e) Orozco, Paton, Robinson, Sarkis

20) Si exactement deux professeurs ont été engagés en 1992, alors laquelle des propositions suivantes pourrait être vraie ?

- a) Orozco, Paton et Togo ont une spécialité en commun.

- b) Madison, Paton et Togo ont une spécialité en commun.
- c) Exactement deux professeurs ont été engagés en 1991.
- d) Exactement deux professeurs ont été engagés en 1993.
- e) Paton a été engagé en 1991.

21) Si Paton et Madison ont une spécialité en commun, alors laquelle des propositions suivantes doit être vraie ?

- a) Nilsson n'a aucune spécialité en commun avec Paton.
- b) Exactement un professeur a été engagé en 1990.
- c) Exactement un professeur a été engagé en 1991.
- d) Exactement deux professeurs ont été engagés à chaque deux ans.
- e) Paton a été engagé un an avant Sarkis.

Partie 8

Les questions 22 à 24 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

Un éleveur doit décider lesquels de ses sept chevaux – Nimbler, Orion, Pride, Renegade, Sam, Trix et Velvet – il vendra aux enchères cette année. L'éleveur devra déterminer quel cheval vendre en fonction des conditions suivantes :

- *Si Renegade est vendu aux enchères, Pride ne l'est pas.*
- *Soit Orion, soit Nimbler est vendu aux enchères, mais non les deux.*
- *Si Sam n'est pas vendu aux enchères, Renegade ne le sera pas non plus.*
- *Si Trix n'est pas vendu aux enchères, Velvet l'est.*

22) Laquelle des listes suivantes est une liste acceptable des chevaux qui seront vendus aux enchères ?

- a) Orion, Renegade, Sam
- b) Pride, Renegade, Trix, Velvet
- c) Orion, Pride, Sam, Velvet
- d) Nimbler, Renegade, Trix, Velvet
- e) Nimbler, Orion, Renegade, Sam, Velvet

23) Si Renegade est vendu, laquelle des propositions suivantes doit être vraie ?

- a) Sam et Orion sont vendus.
- b) Nimbler et Pride ne sont pas vendus.
- c) Au moins cinq chevaux sont vendus.
- d) Au plus quatre chevaux sont vendus.
- e) Au moins deux chevaux ne sont pas vendus.

24) Si Renegade ou Sam est vendu, mais pas les deux, laquelle des propositions suivantes pourrait être une liste complète et précise des chevaux qui ne seront pas vendus ?

- a) Renegade, Trix
- b) Nimbler, Sam, Velvet
- c) Orion, Sam, Trix
- d) Orion, Pride, Renegade
- e) Orion, Pride, Renegade, Nimbler

Partie 9

Les questions 25 à 27 porteront sur le texte qui suit (encerclez la bonne réponse):

Lors d'une visite au Musée d'Histoire naturelle, chacun des six enfants – Juana, Kyle, Lucita, Salim, Thanh et Veronica – est accompagné par l'un des trois adultes – Mme Margoles, M. O'Connell et Mme Podorski. Chaque adulte accompagne exactement deux des enfants, d'après les conditions suivantes :

- *Si Mme Margoles accompagne Juana, alors Mme Podorski accompagne Lucita.*
- *Si Kyle n'est pas accompagné par Mme Margoles, alors Veronica est accompagnée par M. O'Connell.*
- *Soit Mme Margoles, soit M. O'Connell accompagne Thanh.*
- *Juana n'est pas accompagnée par le même adulte que Kyle; Lucita n'est pas accompagnée par le même adulte que Salim; Thanh n'est pas accompagné par le même adulte que Veronica.*

25) Si Mme Margoles accompagne Lucita et Thanh, alors laquelle des propositions suivantes doit être vraie ?

- a) Juana est accompagnée par le même adulte que Veronica.
- b) Kyle est accompagné par le même adulte que Salim.
- c) Juana est accompagnée par M. O'Connell.
- d) Kyle est accompagné par Mme Podorski.
- e) Salim est accompagné par Mme Podorski.

26) Si Mme Podorski accompagne Juana et Veronica, alors Mme Margoles pourrait accompagner laquelle des paires d'enfants qui suivent ?

- a) Kyle et Salim.
- b) Kyle et Thanh.
- c) Lucita et Salim.
- d) Lucita et Thanh.
- e) Salim et Thanh.

27) Quelle paire d'enfants M. O'Connell ne peut pas accompagner ?

- a) Juana et Lucita.
- b) Juana et Veronica.

- c) Kyle et Thanh.
- d) Lucita et Thanh.
- e) Salim et Veronica.

Annexe P – Tâche Switch

Exemples des réponses attendues lors du switch task

Exemples des réponses attendues en fonction du stimulus présenté sur l'écran. Les stimuli présentés seront ceux de la version 1A. Les stimuli des autres versions ne seront pas présentés puisque le principe est le même.

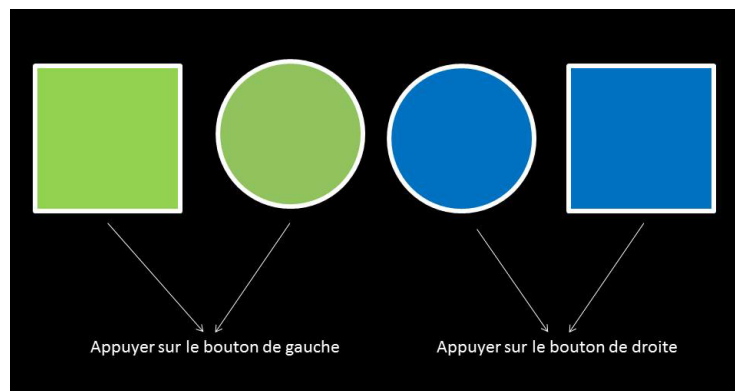


Figure 5 – Exemple des réponses attendues lors de la première condition homogène de la version 1A. Lorsque le stimulus présenté est de couleur verte, la réponse attendue est d'appuyer sur le bouton de gauche. Lorsque le stimulus présenté est de couleur bleue, la réponse attendue est d'appuyer sur le bouton de droite.

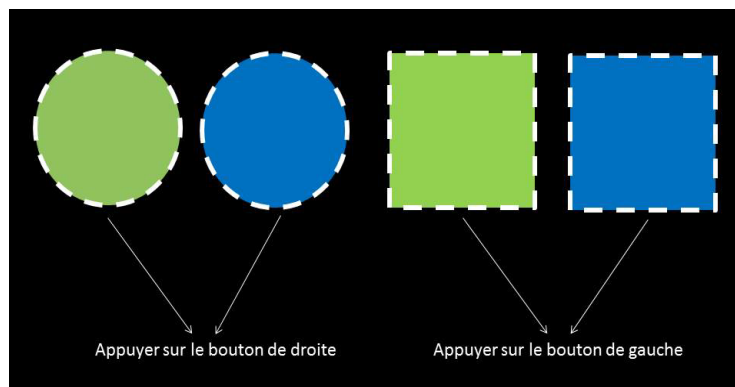


Figure 6 – Exemple des réponses attendues lors de la deuxième condition homogène de la version 1A. Lorsque le stimulus présenté est de forme carrée, la réponse attendue est d'appuyer sur le bouton de gauche. Lorsque le stimulus présenté est de forme circulaire, la réponse attendue est d'appuyer sur le bouton de droite.

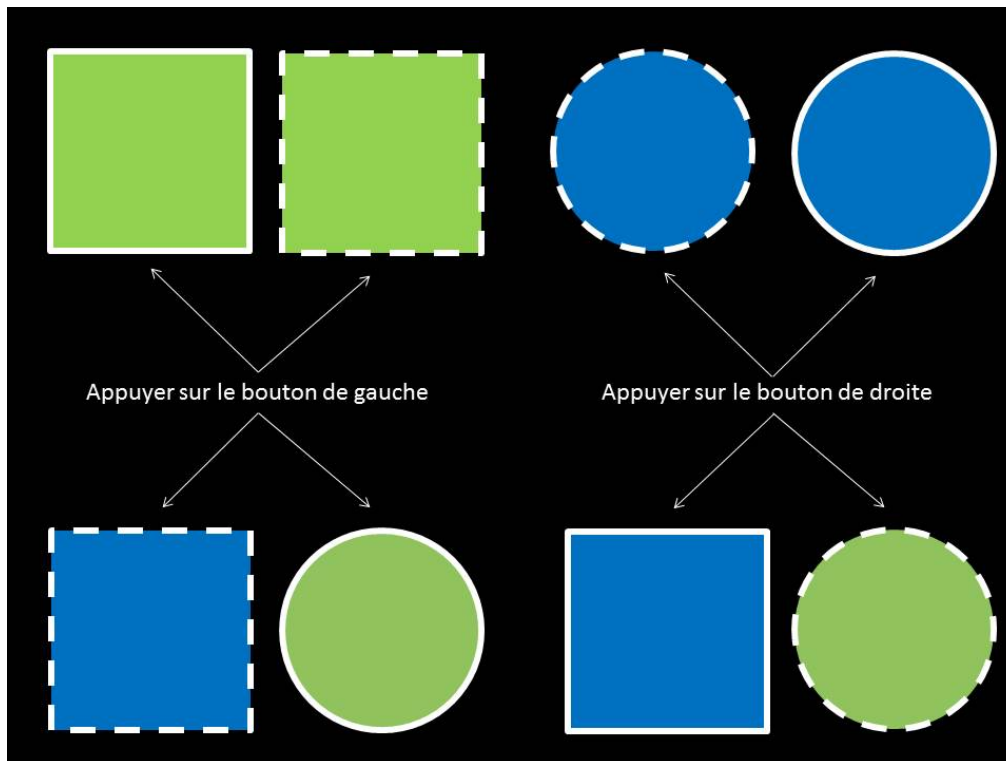


Figure 7 - Exemple des réponses attendues lors de la condition hétérogène de la version 1A. Lorsque le contour du stimulus présenté est une ligne pleine, le participant doit répondre selon la couleur de la forme. Ainsi, si le stimulus est de couleur verte, il doit appuyer sur le bouton de gauche et si le stimulus est bleu, il doit appuyer sur le bouton de droite. Lorsque le contour du stimulus est une ligne pointillée, le participant doit répondre selon la forme. Ainsi, si le stimulus est de forme carrée, il doit appuyer sur le bouton de gauche et si le stimulus est de forme circulaire, il doit appuyer sur le bouton de droite.

Exemples d'essais lors du switch task

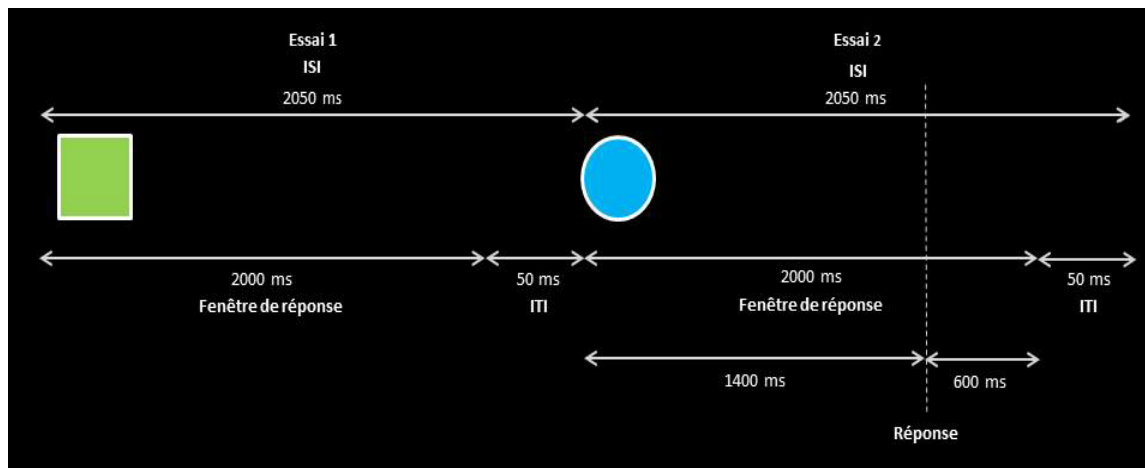


Figure 8 – Exemples d’essais illustrant le temps de présentation, l’intervalle inter-stimuli (ISI – inter-stimuli interval) et l’intervalle inter-essai (ITI – inter-trial interval), dépendamment du temps de réponse du participant. Dans l’essai 1, le participant n’effectue pas de réponse avant la fin de la fenêtre de réponse. Le stimulus présenté disparaît après 2000 ms de réponse et le prochain stimulus n’est présenté que 50 ms plus tard. Dans l’essai 2, le participant effectue une réponse après 1400 ms de présentation du stimulus. À ce moment, le stimulus disparaît et le prochain sera présenté 650 ms plus tard. Ainsi, le temps de présentation entre deux stimuli est constant (2050 ms).

Annexe Q – Annonce générale de l'étude



INTÉRESSÉ(E) À PARTICIPER À UNE ÉTUDE ET NOUS AIDER À FAIRE AVANCER LES CONNAISSANCES SUR LES COMMOTIONS CÉRÉBRALES ?

OBJECTIF : Étudier le phénomène de la **FATIGUE COGNITIVE** chez des individus ayant un historique de **COMMOTION CÉRÉBRALE** d'origine sportive.

AVANTAGES : La satisfaction d'avoir contribué à l'avancement des connaissances quant aux conséquences d'une commotion cérébrale. À la fin de l'étude, les résultats généraux de l'étude vous seront également communiqués par courriel sous forme de lettre d'information.

DURÉE : Divisé en deux séances, respectivement de 30 minutes et de 2h30.

CRITÈRES D'INCLUSION

- Homme ou femme âgé(e) entre 18 et 30 ans;
- Participant à une équipe sportive de façon compétitive (hockey, soccer, football, lacrosse, rugby, cheerleading, volleyball, athlétisme, natation, etc.);
- Étudiant au cégep ou à l'université;
- N'ayant **JAMAIS OU** ayant déjà subi **AU MOINS UNE** commotion cérébrale d'origine sportive. La **DURÉE DE TEMPS MINIMUM** depuis la commotion doit être de **2 MOIS** et la **DURÉE MAXIMALE** de **24 MOIS**.

CRITÈRES D'EXCLUSION

- Problème neurologique (épilepsie, migraines, démence, maladies cérébro-vasculaires, AVC, sclérose en plaques, infections du système nerveux, tumeurs au cerveau), troubles neurodéveloppementaux (trouble du spectre de l'autisme, TDAH, troubles de communication, troubles moteurs, troubles spécifiques des apprentissages, déficience intellectuelle) ou problèmes psychiatriques (dépression, psychose, anxiété, trouble bipolaire, schizophrénie) ;
- Trauma craniocérébral qui n'est pas d'origine sportive ;
- Avoir déjà subi une fracture du crâne ;
- Historique d'opération au cerveau ;

- Prise de médicaments ayant des effets psychoactifs (ayant un impact, sur l'humeur, la psychée ou la conscience);
- Avoir une pathologie systémique importante ;
- Historique d'abus de substances (alcool, drogues);
- Avoir subi une anesthésie générale au cours des 2 dernières années;
- Avoir un trouble important de la vision ou daltonisme.

Facebook : Neurodevlab

Courriel : 

Téléphone : **514-343-6111** poste : **29914**

CEPSUM, 2100 boul. Édouard-Montpetit, Montréal (Qc), H3T 1J4, **6^e étage, Bureau 6209-1**

Annexe R – Certificat d'éthique

Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)

21 novembre 2018

Objet: Approbation éthique – « Les effets d'un effort cognitif prolongé chez des athlètes ayant subi une commotion cérébrale »

M. Gabriel Caron,

Le Comité d'éthique de la recherche en santé (CERES) a étudié le projet de recherche susmentionné et vous a fait parvenir ses commentaires et demandes de corrections. Au 1^{er} novembre 2018, votre dossier a été transféré au Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC) pour en assurer dorénavant le suivi. Le CERC a évalué vos réponses et documents amendés et a jugé le tout satisfaisant aux exigences du CERES. En conséquence, il a délivré le certificat d'éthique demandé. Vous trouverez ci-joint une copie numérisée de votre certificat; copie également envoyée à votre directeur/directrice de recherche et au Bureau Recherche-Développement-Valorisation. Vous devrez faire parvenir une copie de ce certificat à la technicienne en gestion de dossiers étudiants (TGDE) de votre département.

Notez qu'il y apparaît une mention relative à un suivi annuel et que le certificat comporte une date de fin de validité. En effet, afin de répondre aux exigences éthiques en vigueur au Canada et à l'Université de Montréal, nous devons exercer un suivi annuel auprès des chercheurs et étudiants-chercheurs.

De manière à rendre ce processus le plus simple possible et afin d'en tirer pour tous le plus grand profit, nous avons élaboré un court questionnaire qui vous permettra à la fois de satisfaire aux exigences du suivi et de nous faire part de vos commentaires et de vos besoins en matière d'éthique en cours de recherche. Ce questionnaire de suivi devra être rempli annuellement jusqu'à la fin du projet et pourra nous être retourné par courriel. La validité de l'approbation éthique est conditionnelle à ce suivi. Sur réception du dernier rapport de suivi en fin de projet, votre dossier sera clos.

Il est entendu que cela ne modifie en rien l'obligation pour le chercheur, tel qu'indiqué sur le certificat d'éthique, de signaler au Comité tout incident grave dès qu'il survient ou de lui faire part de tout changement anticipé au protocole de recherche.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs,

Nathalie Folch, présidente
Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)
Université de Montréal

c.c. Gestion des certificats, BRDV

Dave Ellemberg, professeur titulaire, Département de kinésiologie
Saida Ettaki

p.j. Certificat #18-040-CERES-P

Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC), selon les procédures en vigueur, en vertu des documents qui lui ont été fournis, conclut que le projet de recherche suivant respecte les règles d'éthique énoncées dans la Politique sur la recherche avec des êtres humains de l'Université de Montréal.

Projet	
Titre du projet	Les effets d'un effort cognitif prolongé chez des athlètes ayant subi une commotion cérébrale
Étudiant requérant	Gabriel Caron ([REDACTED]), candidat à la M. Sc. en psychologie, Faculté des arts et sciences - Département de psychologie
Sous la direction de	Dave Ellemberg, professeur titulaire, Département de kinésiologie, Université de Montréal

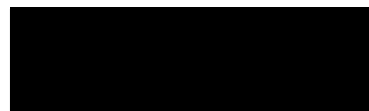
Financement	
Organisme	Non financé
Programme	
Titre de l'octroi si différent	
Numéro d'octroi	
Chercheur principal	
No de compte	

MODALITÉS D'APPLICATION

Tout changement anticipé au protocole de recherche doit être communiqué au CERES qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique.

Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave doit être immédiatement signalé au Comité

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du Comité.



Nathalie Folch, présidente
Comité d'éthique de la recherche clinique
(CERC)
Université de Montréal

21 novembre 2018
Date de délivrance

1er décembre 2019
Date de fin de validité

Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)

18 octobre 2019

Objet: Certificat d'approbation éthique - 1er renouvellement – « Les effets d'un effort cognitif prolongé chez des athlètes ayant subi une commotion cérébrale »

M. Gabriel Caron,

Le Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC) a étudié votre demande de renouvellement pour le projet de recherche susmentionné et a délivré le certificat d'éthique demandé suite à la satisfaction des exigences qui prévalent. Vous trouverez ci-joint une copie numérisée de votre certificat; copie également envoyée à votre directeur/directrice de recherche et à la technicienne en gestion de dossiers étudiants (TGDE) de votre département.

Notez qu'il y apparaît une mention relative à un suivi annuel et que le certificat comporte une date de fin de validité. En effet, afin de répondre aux exigences éthiques en vigueur au Canada et à l'Université de Montréal, nous devons exercer un suivi annuel auprès des chercheurs et étudiants-chercheurs.

De manière à rendre ce processus le plus simple possible et afin d'en tirer pour tous le plus grand profit, nous avons élaboré un court questionnaire qui vous permettra à la fois de satisfaire aux exigences du suivi et de nous faire part de vos commentaires et de vos besoins en matière d'éthique en cours de recherche. Ce questionnaire de suivi devra être rempli annuellement jusqu'à la fin du projet et pourra nous être retourné par courriel. La validité de l'approbation éthique est conditionnelle à ce suivi. Sur réception du dernier rapport de suivi en fin de projet, votre dossier sera clos.

Il est entendu que cela ne modifie en rien l'obligation pour le chercheur, tel qu'indiqué sur le certificat d'éthique, de signaler au Comité tout incident grave dès qu'il survient ou de lui faire part de tout changement anticipé au protocole de recherche.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs,

Camille Assémat
Conseillère en éthique de la recherche
Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)
Université de Montréal

c.c. Gestion des certificats, BRDV
Dave Ellemberg, professeur titulaire, Département de kinésiologie
Saida Ettaki
p.j. Certificat #18-040-CERES-P(1)

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

- 1^{er} renouvellement -

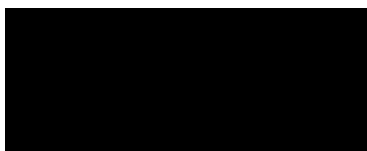
Le Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC), selon les procédures en vigueur et en vertu des documents relatifs au suivi qui lui ont été fournis conclut qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans la Politique sur la recherche avec des êtres humains de l'Université de Montréal.

Projet	
Titre du projet	Les effets d'un effort cognitif prolongé chez des athlètes ayant subi une commotion cérébrale
Étudiant requérant	Gabriel Caron (), candidat à la M. Sc. en psychologie, Faculté des arts et sciences - Département de psychologie
Sous la direction de	Dave Ellemberg, professeur titulaire, Département de kinésiologie, Université de Montréal
Note :	Modifications au protocole de recherche (critères d'inclusion) (9 juillet 2019)
Financement	
Organisme	Non financé
Programme	
Titre de l'octroi si différent	
Numéro d'octroi	
Chercheur principal	
No de compte	

MODALITÉS D'APPLICATION

Tout changement anticipé au protocole de recherche doit être communiqué au Comité qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique. Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave doit être immédiatement signalé au Comité.

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du Comité.



Camille Assémat
Conseillère en éthique de la recherche
Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)
Université de Montréal

18 octobre 2019
Date de délivrance du renouvellement ou de la réémission*

1er novembre 2020
Date du prochain suivi

21 novembre 2018
Date du certificat initial

1er novembre 2020
Date de fin de validité

*Le présent renouvellement est en continuité avec le précédent certificat